



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ANÁLISIS DEL CLIMA MARÍTIMO Y EVENTOS DE INUNDACIÓN EN LA ZONA DE SAN ANDRÉS, TENERIFE

Trabajo realizado por:

Iratxe López de Subijana Esteban

Dirigido:

Gabriel Díaz Hernández

Titulación:

Grado en Ingeniería Civil

Mención:

Hidrología

Santander, julio de 2021

TRABAJO FIN DE GRADO

RESUMEN

Título: Análisis del clima marítimo y eventos de inundación en la zona de San Andrés, Tenerife.

Autor: Iratxe López de Subijana Esteban

Director: Gabriel Díaz Hernández

Mención: Hidrología

Convocatoria: Julio 2021

Palabras claves: Clima marítimo, Oleaje, Propagación, Rebases, Inundaciones, Protección costera, Dique, IHCantabria, MSP, Análisis hidrodinámico.

En el presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) de la mención de hidrología se ha abordado el análisis del clima marítimo en la localidad de San Andrés, Tenerife.

Dicho estudio ha atacado el problema de los sucesos de inundación en el pueblo de San Andrés con el propósito principal de proyectar una estructura de abrigo que aminorase la periodicidad y los desperfectos materiales y económicos asociados a estos. El punto de partida del análisis ha sido la hemeroteca consultada, en la cual se recogían diversos eventos de rebase de la avenida marítima. El objetivo fundamental de esta consulta ha sido lograr mediante un razonamiento deductivo el patrón y los factores responsables de las inundaciones.

Después de haber determinado las constituyentes principales de los eventos de rebase, se han modelado diversos dominios numéricos con el fin de propagar la información del clima marítimo proporcionadas por las bases de datos, medidas en aguas profundas, hasta el pie de la avenida marítima de San Andrés, emplazada en aguas someras. El modelo numérico ha permitido comprender el funcionamiento hidrodinámico de la costa ante diversos oleajes, lo que ha resultado de vital importancia en el momento de plantear una estructura de abrigo.

Una vez detalladas las particularidades del oleaje a pie del paseo, se han calculado los caudales de *overtopping* mediante el procedimiento concretado por el reglamento propuesto por el EuroTop. Debido primordialmente a que los caudales logrados eran significativamente superiores a los máximos recomendados por el código, ha quedado en evidencia la necesidad de resguardar el frente de la avenida mediante una infraestructura de protección.

El análisis hidrodinámico ha permitido establecer que las funciones sustanciales del dique eran no solo bloquear la propagación del oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras sino también compartimentar la costa para reducir el acoplamiento longitudinal de ondas largas. A lo largo del TFG se ha llevado a cabo el esbozo y estudio de diversas estrategias que podían ser válidas para minimizar la repercusión de las olas en San Andrés. A continuación, se ha ejecutado nuevamente un modelaje numérico, incluyendo esta vez las estructuras planteadas. Los resultados obtenidos han conducido a la determinación de la estructura definitiva.

Finalmente, se ha reproducido con el modelo numérico una última vez el comportamiento de la estructura finalista con propósito de verificar su efectividad. Ha sido posible concluir que el espigón propuesto reduce de manera considerable las alturas de ola a pie de la avenida marítima y es, por tanto, una solución eficaz. Sin embargo, para cerciorar con total certeza que no acaecen

rebases a lo largo de todo el frente, es necesario modificar ligeramente el diseño proyectado para reforzar algunas zonas concretas. Estas zonas se localizan especialmente en la parte baja de la avenida marítima y en la franja del espigón que separa el pueblo de la playa de Las Teresitas.

ABSTRACT

Title: Analysis of the maritime climate and flood events in the area of San Andrés, Tenerife.

Author: Iratxe López de Subijana Esteban

Director: Gabriel Díaz Hernández

Minor: Hidrology

Call: July 2021

Key Words: Maritime climate, Waves, Propagation, Overflows, Floods, Coastal protection, Dike, IHCantabria, MSP, Hydrodynamic analysis.

The hereby presented Final Degree Project addresses the analysis of the maritime climate in the town of San Andrés, Tenerife.

The mentioned study has tackled the problem caused by flood events in the area with the main goal of proposing a shelter structure that would reduce their periodicity and the material and economic damage associated with them. The starting point of the analysis were the consulted newspapers, in which various overflow events were collected. The main objective of this search has been to stumble upon the patterns and factors responsible for floods through deductive reasoning.

After determining the main constituents of the overflow events, various numerical domains have been modelled in order to propagate the maritime climate data provided by the databases, measured in deep waters, to the base of the maritime avenue of the village, which is located in shallow waters. The numerical model has made it possible to understand the hydrodynamic behaviour of the coast when facing a variety of incoming waves. This process has been of vital importance when considering the design of a shelter structure.

Once the characteristics of the waves at the base of the structure were detailed, the overtopping discharge has been calculated using the procedure specified by the EuroTop regulation. Due primarily to the fact that obtained flow rates were significantly higher than allowable maximums determined by code, the need to protect the front of the avenue by means of a protection infrastructure has become evident.

The hydrodynamic analysis has established that the substantial objectives of the proposed dike were not only to block the propagation of waves from deep to shallow waters, but also to compartmentalize the coast to reduce the longitudinal coupling of long waves. Throughout the TFG, the design and study of various strategies that could be valid to minimize the impact of the waves in San Andrés have been carried out. Subsequently, numerical assessment has been once again performed, including this time the proposed structures when defining the model. Obtained results have led to the determination of the definitive structure.

Finally, the behaviour of the finalist structure has been one last time reproduced using the numerical model. The aim of this run was to ensure the effectiveness of the proposed dike. It has been possible to conclude that the proposed breakwater considerably reduces the recorded wave heights at the base of the maritime avenue and is, therefore, an operational solution.

However, to ensure with complete certainty that no overflows would take place along the entire length of the avenue, it is necessary to slightly modify the projected design to reinforce some specific areas. These areas are especially located in the lower part of the maritime avenue and in the strip of the breakwater that separates the town from Las Teresitas beach.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor, Gabriel Díaz Hernández, quien con sus conocimientos y apoyo me ha guiado a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar así los resultados que buscaba.

También quiero agradecer a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, por brindarme a lo largo de estos cuatro años la oportunidad de formarme como futura profesional del sector. Me gustaría agradecer todo el apoyo recibido, no solo del grupo docente, sino también de todos los investigadores, personal administrativo y servicios presentes en la escuela.

Por último, quiero agradecer a todos mis compañeros y familia, por apoyarme en los días más grises. En especial, quiero mencionar a mis compañeros de promoción, quienes se han convertido en grandes amigos fuera de las puertas de la escuela. No puedo olvidar a mis compañeras de piso, Andrea y Elisa, ya que este TFG no hubiese visto la luz sin las largas tardes de ambiente de trabajo en la mesa del salón.

Tabla de contenido

RESUMEN	3
ABSTRACT	5
AGRADECIMIENTOS	7
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Descripción general de la comunidad de San Andrés	11
1.2 Descripción general de la costa.....	13
1.3 Problemática identificada y exposición histórica de eventos	14
1.4 Objetivo	22
2. ANÁLISIS DE LOS EVENTOS IDENTIFICADOS	23
2.1 Descripción del clima marítimo.....	24
2.1.1 Descripción teórica general de los procesos asociados al clima marítimo	24
2.1.1.1 Nivel del mar	24
2.1.1.2 Relación entre el registro histórico de inundaciones y los factores del oleaje...	28
2.1.1.3 Mar de fondo y mar de viento	29
2.1.1.4 Ondas infragravitatorias.....	31
2.1.1.5 Procesos físicos de transformación del oleaje	32
2.1.2 Fuentes de información disponible.....	34
2.1.2.1 Datos de partida	34
2.1.2.2 Revisión de la fuente de datos EMODnet	35
2.1.3 Batimetría.....	36
2.2 Descripción general del clima marítimo en la zona de estudio	37
2.2.1 Clima marítimo general.....	37
2.2.2 Clima marítimo estacional.....	42
2.2.2.1 Primavera (20 marzo – 21 junio).....	43
2.2.2.2 Verano (21 junio – 22 septiembre)	43
2.2.2.3 Otoño (22 septiembre – 21 diciembre).....	44
2.2.2.4 Invierno (21 diciembre – 20 marzo)	45
2.2.3 Conclusiones del análisis estacional.....	45
2.2.4 Clima marítimo de los eventos de rebase	46
6 de enero de 2002	47
2 de julio de 2007	48
23 de diciembre de 2010.....	49
14 de mayo de 2011	50
29 de agosto de 2011	51

18 de junio de 2012.....	52
27 de agosto de 2014.....	53
2.3 Discusión	54
2.4 Conclusiones del análisis del clima marítimo.....	55
3. EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LOS EVENTOS DE REBASE E INUNDACIÓN.....	56
3.1 Creación y descripción del modelo dinámico	57
3.1.1 Introducción	57
3.1.2 Metodología	58
3.1.3 Modelo numérico seleccionado.....	59
3.1.4 Montaje del modelo.....	60
3.2 Reproducción numérica de los eventos de inundación	67
3.2.1 Grupo 1 – Oleaje del Este	68
3.2.2 Grupo 2 – Oleaje del Sur	69
3.2.3 Grupo 3 – Oleaje del Sureste.....	70
3.3 Descripción del funcionamiento dinámico de los eventos	71
3.3.1 Propagación del oleaje	71
3.3.2 Caracterización del rebase de la estructura de la avenida marítima.....	72
4. PROPUESTA DE ALTERNATIVAS	78
4.1 Metodología	79
4.2 Limitaciones de diseño.....	80
4.3 Planteamiento de estrategias	80
4.3.1 Conclusiones de las estrategias.....	83
4.4 Planteamiento de las alternativas finalistas.....	84
4.4.1 Conclusiones de las alternativas finalistas	86
5. CONCLUSIONES GENERALES Y ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN DEFINITIVA	89
5.1 Modelaje de la solución definitiva	90
5.1.1 Modelo oleaje del Grupo 1 – Este	90
5.1.2 Modelo oleaje del Grupo 2 – Sur	91
5.1.3 Modelo oleaje del Grupo 3 – Sureste.....	92
5.2 Resultados de agitación de la solución definitiva	93
5.2.1 Grupo 1 – Oleaje del Este	93
5.2.2 Grupo 2 – Oleaje del Sur	94
5.2.3 Grupo 3 – Oleaje del Sureste.....	95
5.3 Resultados de altura en puntos de control y rebases.....	96
5.4 Análisis de efectividad relativa de la estructura	99
5.5 Conclusiones generales del análisis	101

APÉNDICES	102
Apéndice 1. Listado de figuras	103
Apéndice 2. Listado de tablas.....	105
Apéndice 3. Listado de gráficos.....	105
Apéndice 4. Referencias.....	106

1. INTRODUCCIÓN



1.1 Descripción general de la comunidad de San Andrés

San Andrés, que cuenta hoy en día con la consideración de pueblo, se localiza a unos 8 km al Noreste de la capital de Santa Cruz de Tenerife. Se sitúa en el distrito de Anaga, localizándose específicamente en la parte Sur del macizo de Anaga. Cuenta con una superficie de unos 20.91 km², siendo uno de los barrios más extensos y poblados de la isla.

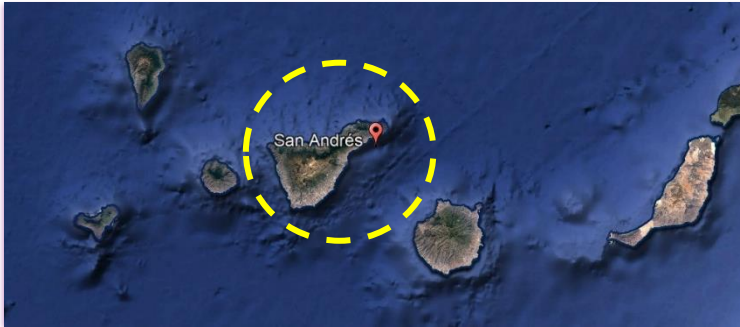


Figura 1: Localización de San Andrés

El pueblo, fundado en el siglo XV, se trata de uno de los núcleos más antiguos de Tenerife habiendo constituido, además, un municipio independiente a lo largo del siglo XIX. Esto lo convierte en una de las localidades más significativas dentro del municipio.

Cuenta además con una gran extensión de espacio natural protegido por instituciones como la UNESCO. La población se estima en unos 3500 habitantes, aunque varía de manera considerable dependiendo de la estación del año. San Andrés es conocido por su carácter marinero y rural.

Uno de los principales atractivos del pueblo es la playa de las Teresitas. Esta es una de las playas más conocidas de la isla y está considerada por la opinión pública como una de las mejores. La playa tiene una longitud aproximada de unos 1300 m y una anchura media de 80 m. Su arena puede ser descrita como dorada y fina. No siempre ha sido así, pues fue transformada artificialmente en 1970 sobre una anterior de arena negra volcánica. Este relleno se realizó

utilizando principalmente arena del Sahara, con el fin principal de ampliar su extensión. En esa misma época se construyó el dique o rompeolas que protege la playa del oleaje. Esta estructura tiene una longitud aproximada de 1 km y se extiende desde la zona de la Cofradía de Pescadores de San Andrés hasta la Punta de Los Órganos. Presenta dos bocanas en sus extremos y dista una distancia media de 150 m desde la orilla.



Figura 2: Avenida de San Andrés



Figura 3: Ladera de San Andrés

1.2 Descripción general de la costa

La costa de la isla de Tenerife es por lo general muy accidentada y abrupta, aunque esta característica no exime a la isla de contar con un importante número de playas y calas. La costa Norte, donde se localiza San Andrés, es más escarpada y abrupta que la costa Sur. Así mismo, en todo el litoral, destacan grandes acantilados y barrancos, que son estrechos y profundos. Esta zona posee también playas importantes de arena negra, a pesar de que sea en el Sur donde más predominan las playas con este tipo de arena oscura. Por lo tanto, encontraremos principalmente playas de arena más clara en la zona de interés.

Por otro lado, el litoral de la vertiente Este está muy castigado la mayor parte del año por los vientos del Noreste y por los temporales del Sudoeste durante el invierno. Los vientos alisios colisionan con el macizo de Anaga e inciden de forma oblicua en la costa. Cuando esto ocurre, se forma un corredor cercano al litoral donde se forman vientos de gran intensidad. Además, estas corrientes provocan un oleaje de período corto y olas muy peraltadas.

Como se ha mencionado anteriormente, el litoral de Anaga es una costa alta y rocosa, formada por valles profundos y cortos, separados por estrechos cauces fluviales. Las montañas no tienen una altitud mayor a los 1000 m, pero los desniveles son considerables. Desde Punta de Anaga hasta San Andrés existen unas pequeñas playas, de longitudes menores a 200 m, de arena negra de tamaño medio y de difícil acceso, estando la mayoría de ellas expuestas al oleaje de mar abierto.

Por lo tanto, la Playa de las Teresitas es una playa regenerada de arena dorada y actualmente protegida con un espigón y un dique exento paralelo a la línea de costa, que además de cumplir la función de atenuar el oleaje, impide la eliminación de arena.



La zona costera de San Andrés actualmente experimenta eventos de inundación costera que anualmente suponen graves pérdidas económicas e infraestructurales. Es por este motivo que el presente TFG se encarga de analizar, evaluar y diagnosticar las características climáticas que fomentan este tipo de eventos de inundación, así como, proponer medidas de mitigación o alternativas de actuación para intentar minimizar estos efectos.

1.3 Problemática identificada y exposición histórica de eventos

Como se demuestra a continuación y mediante una recopilación de artículos de prensa, la costa de San Andrés ha venido experimentando ciertos eventos de inundación de forma sistemática con una cadencia anual.

Por ello y para poder comenzar a entender el origen de dichos eventos, se analiza la hemeroteca con el fin de encontrar una posible correlación entre diferentes sucesos, hallar la dependencia entre ellos, determinar las causas que los provocan y encontrar posibles soluciones.

En este TFG, se describe la ya mencionada problemática de la localidad de San Andrés, realizando previamente un análisis de la documentación recopilada. Este apartado puede considerarse una sección de investigación. Las fuentes consultadas recogen periódicos digitales, telediarios, testimonios y otras fuentes similares.

Además, y debido a que la escala temporal de los eventos se concentra en las dos últimas décadas, se considera que los incidentes mencionados pueden ser fácilmente contrastados, siendo por tanto esta, una información de calidad.

Cabe mencionar, que durante el año 2015 se llevó a cabo la construcción de la alternativa de mejora en la costa de San Andrés, pero que dicha configuración no ha sido empleada en el presente TFG, con la finalidad de poder encontrar de forma libre una solución alternativa.

Por lo tanto y a continuación se presentan las notas de prensa relacionadas con eventos de inundación en la costa de San Andrés.

6 de enero 2002 - El día de Reyes dejó mucha calima y mal tiempo en Tenerife

*“En la zona Norte, la calima y el **fuerte oleaje** se adueñaron de la costa del Norte de Tenerife a partir de la media tarde de ayer”.*

*“En Santa Cruz de Tenerife, la situación no difería mucho de la del resto de la Isla, ya que, en San Andrés, por ejemplo, la **escollera del muelle sufrió una fisura** debido a la fuerza con que golpearon las olas durante todo el día.”*

eldia.es

2 de julio 2007 - Las “llagas” de Anaga

*“efectos del oleaje en la avenida marítima de San Andrés, donde un tiempo extraño en esta época del verano, castigó la noche del domingo y la mañana del lunes una zona acostumbrada a los embates de la mar, pero **que sigue sin la protección de una escollera que sus vecinos piden desde hace muchos años sin que, de momento, les hagan caso las instituciones**”.*

eldia.es

2 de julio 2007 - Los destrozos en la avenida de San Andrés estarán arreglados en 10 días

*“**Los destrozos ocasionados por el fuerte oleaje () en San Andrés estarán solucionados en diez días**”.*

*“Las obras comenzaron () después de que un fuerte mar de fondo **rompiera un tramo de alrededor de diez metros del paseo**. Las obras () tan sólo se centrarán en la **reparación de los daños causados en la vía no en la posibilidad de proteger ese litoral** en el futuro.*

*Varios vecinos expresaron durante la tarde del lunes que **era necesaria la construcción de un espigón que protegiera la zona**. “*

laopinion.es





23 diciembre 2010 - Consecuencias del oleaje en San Andrés

*“La avenida marítima ha sido cerrada al tráfico por levantarse en parte y hacer el mar un **gran socavón en la acera**. Los vecinos aseguran que **hace falta una escollera**”.*

*“No es la primera vez que ocurre ni era la última, afirman los vecinos. Todos los años en alguna ocasión el mar termina apoderándose de esta carretera que discurre paralela a la costa. Sus habitantes llevan **años reivindicando una escollera** para frenar los embates del mar”.*

antena3canarias.com



14 de mayo 2011 - Fuerte oleaje en San Andrés

*“Varios establecimientos y casas ubicadas en el pueblo pesquero de San Andrés afectados por el **fuerte oleaje reinante en la zona**. Las olas **saltaron el paseo marítimo hasta adentrarse e inundar** varios restaurantes de la zona”.*

*“Esta **situación ha sido permanente en la vida de este pueblo** () y el dique sigue siendo un sueño”.*

diariodeavisos.com

17 de mayo 2011 - Más de diez mil euros en pérdidas entre los comercios de San Andrés

*“**Graves desperfectos en el firme y pérdidas económicas** en varios establecimientos del pueblo marino. Una primera aproximación al coste de los daños materiales y las pérdidas del género cifra en más de 10.000 euros”.*

*“**reclamó medidas urgentes en la escollera** que está frente al pueblo de Pescadores, () cada año, **tanto en mayo como en septiembre, se producen estas crecidas**”.*

eldia.es

Como puede observarse a continuación, uno de los eventos de inundación de mayor gravedad tuvo lugar a finales de agosto del año 2011, especialmente durante los días 29, 30 y 31. Durante dichas inundaciones el agua anegó más de una veintena de viviendas y destruyó pavimento, vehículos y árboles.

30 de agosto 2011 - Las olas golpean de nuevo a San Andrés

*“El barrio costero de San Andrés sufrió ayer un nuevo azote del oleaje. Al menos cinco casas acabaron inundadas, con un **metro de altura de agua**, y unos 15 vehículos quedaron inservibles”.*

*“La **pleamar aumenta en intensidad con los cambios de Luna** que ayer entraba en su **fase de Luna nueva**. En estos días del mes es cuando **las mareas son más largas y arrastra más el agua**. A este fenómeno se ha sumado la **presencia de tiempo del Sur** lo que provoca **más intensidad y fuerza en el mar**”.*

*“Todos los vecinos coinciden al afirmar que la culpa de que **el mar entre hasta más de cien metros dentro del pueblo**, es la **falta de una escollera** que proteja el frente de su barrio. Por ella luchan desde hace más de 60 años sin () respuesta que les satisfaga”.*

laopinion.es



Con el fin de analizar más detalladamente el suceso de inundación de agosto de 2011, se procede a estudiar un vídeo del mismo. Se muestran varias capturas con el propósito de establecer los aspectos más relevantes e identificar los procesos de oleaje más significativos y las zonas mayoritariamente afectadas. Se realiza la visualización del video con el objetivo de llevar a cabo un análisis deductivo observacional.



Figura 4: Localización de los rebases de la avenida

Como puede advertirse, al observar el video, tres son las zonas de la avenida de San Andrés que se ven primordialmente afectadas por el desborde de las olas. Estas áreas pueden verse resaltadas en la imagen. Se localizan principalmente en la zona media y zona cercana a la Cofradía de Pescadores. En la siguiente serie, puede revisarse la secuencia de esta inundación.



Figura 5: Serie de inundación de la avenida

En primer lugar, se aprecia cómo un oleaje incidente del Sur con un periodo de alrededor de 16 s, golpea inicialmente el área baja de la avenida marítima y avanza sobrepasando la carretera a su paso hacia la zona de la Cofradía. Las inundaciones son causadas por sucesiones de olas. Periódicamente se produce un conjunto de olas de mayor altura que durante un periodo de tiempo causa el rebase de la estructura de la avenida. Entre estos conjuntos de olas, se suceden periodos de calma, en los que la avenida no se ve afectada. En el video puede observarse cómo las primeras olas que componen estos conjuntos causan rebases principalmente en la zona baja de la avenida y las últimas, por el contrario, principalmente en la zona de la Cofradía de Pescadores (situada en la parte superior de las fotografías). Cabe mencionar que los mayores rebases tienen lugar a mitad del periodo de incidencia del conjunto de olas.

En segundo lugar, se aprecia que la duración de cada inundación es cíclica, es decir, desde que ocurre el primer rebase hasta que ocurre el último (provocado por la misma serie de olas), transcurre el mismo tiempo. Puede sospecharse que el hecho de que el rebase de la avenida ocurra en momentos específicos y durante un periodo de tiempo concreto, puede ser debido al atrapamiento longitudinal (a lo largo del paseo marítimo) del oleaje incidente.

En las siguientes noticias se detalla cómo, tras las inundaciones de 2011, el Ayuntamiento levantó una estructura en forma de muro con el fin de prevenir las mismas. Sin embargo, un nuevo temporal con fuerte oleaje “tumbó” este muro, dejando patente que era necesario desarrollar una nueva solución.

18 de junio 2012 - El oleaje “tumba” el nuevo muro de San Andrés

*“El ayuntamiento **levantó** la **estructura** tras las inundaciones de agosto de 2011”.
El muro construido para evitar las inundaciones que de forma cíclica sufre la avenida de San Andrés en Santa Cruz **no ha soportado** las primeras embestidas del mar”.
La colocación de estas rocas de grandes dimensiones fue la primera actuación con el fin de atajar un problema”.
“El muro construido ya ha demostrado que resulta **insuficiente** para dar una solución a este grave problema”.*

eldiario.es

Tras comprobarse la ineffectividad del muro construido, el Ministerio de Fomento desarrolló un estudio para poder determinar el origen de las inundaciones cíclicas en San Andrés y diseñar una solución definitiva.

En dicho estudio se valoraron un total de nueve soluciones diferentes, determinando que la mejor alternativa era construir una playa doble a lo largo de la avenida principal y un dique discontinuo. Esta solución fue considerada como la que presentaba un mejor comportamiento “logrando minimizar sustancialmente la agitación del oleaje frente a la costa”.

Sin embargo, esta solución no resultó ser tan efectiva como se había pensado, y los eventos de inundación provocados por el fuerte oleaje siguieron causando daños en la avenida de San Andrés, así como en las viviendas más cercanas. Por ello, en el año 2014 se propone un Plan Especial para hacer frente al oleaje.



25 de julio 2014 - El puerto de Tenerife aprueba la licitación urgente del dique de San Andrés

*“El trámite de urgencia permite **reducir** el **plazo** a la presentación de propuestas () y se ha optado por esa vía para que las obras **comiencen** con la **mayor brevedad**”.*

*“El Consejo de Administración del puerto de Santa Cruz de Tenerife, ha aprobado la construcción del **dique de protección** de San Andrés por el **procedimiento de urgencia**”.*

*“El objeto del proyecto es la construcción de un **dique en talud exento y rebasable** en el frente costero de San Andrés, que tendrá una longitud de 360m. Además, la obra se completa con un **contradique**, en su extremo Sur, de 60m.*

El presupuesto de licitación es de 3.986.869 euros y los trabajos tienen un plazo de ejecución de diez meses”.

cadenadesuministros.es

La construcción del dique diseñado debía de ser lo más rápida e inminente posible, debido a que San Andrés seguía expuesto a las inundaciones provocadas por el fuerte oleaje.

27 de agosto 2014 - El oleaje causa estragos en Canarias

*“En el barrio de San Andrés, la **fuerza del mar** ha provocado el cierre de los accesos a la zona”.*

*“La zona más afectada () ha sido el litoral de Santa Cruz, y más concretamente el barrio de San Andrés. Allí las **fuertes olas** han **alcanzado** el **paseo** marítimo causando **destroz**os y provocando cortes intermitentes de los carriles de entrada y salida de la zona”.*

eldiario.es



Entre las propuestas presentadas, el Puerto de Tenerife adjudicó las obras correspondientes al Proyecto de Construcción de Protección del Frente Litoral de San Andrés a Sacyr Construcción en septiembre de 2014. El plazo de ejecución del proyecto se establece de 10 meses y el presupuesto total se fijó en 3.157.723 euros.

El trabajo a realizar consistió en la construcción de un dique de 350 m de longitud a la cota +4 m y un contradique de 60 m. El dique se construyó a base de bloques prefabricados de hormigón de 7 toneladas de peso. Las características principales del proyecto fueron rapidez, seguridad en los plazos de ejecución y fiabilidad.

La obra comenzó de forma oficial el 17 de octubre de 2014 y tras varios retrasos causados por denuncias y recursos presentados frente al Tribunal Supremo, además de diversos eventos de marejada, se finalizó a finales del año 2015.



20 de octubre 2015 - El fuerte oleaje se lleva 60 metros del dique semisumergido de San Andrés

“Ya se está reponiendo lo que ha perdido la escollera. Pero a pesar de lo sucedido, (), se puede comprobar el buen funcionamiento de la obra”.

DiarioDeAvisos

Finalmente, tras la ejecución de la construcción del dique exento, que transcurre casi paralelo a la línea del litoral y está formado por unos 6500 bloques de hormigón, no se han vuelto a registrar inundaciones en el pueblo de San Andrés. Por tanto, se puede concluir que el dique protege de manera efectiva el barrio desde finales del año 2015, habiendo demostrado su efectividad ante fuertes mares de fondo Sur Sureste, modelo que históricamente más afectaba a la zona.

En la tabla a continuación se recoge una breve descripción de los eventos expuestos anteriormente, indicando cualitativamente su mayor impacto sobre la comunidad de San Andrés.

Fecha	Caracterización cualitativa
6/01/2002	Fisura en la escollera del muelle.
02/07/2007	Rotura de un tramo del paseo marítimo.
23/12/2010	Gran socavón en la avenida marítima.
14/05/2011	Inundación de varios establecimientos y desperfectos en el firme.
29/08/2011	Inundación de al menos 5 casas y daños a varios vehículos.
18/06/2012	Daños estructurales en el muro levantado por el ayuntamiento.
27/08/2014	Cierre de los accesos a la zona, corte de carriles y destrozos en el paseo marítimo.
20/10/2015	Daños a lo largo de 60 metros del dique semisumergido durante su proceso de construcción.

Tabla 1: Caracterización cualitativa de los eventos de inundación



1.4 Objetivo

Por todo lo mencionado en el apartado anterior, y teniendo en cuenta la importancia de los eventos de inundación en San Andrés, el principal objetivo de este TFG (mención de hidrología), es establecer el funcionamiento hidrodinámico de la costa de San Andrés ante los eventos de inundación para poder determinar los mecanismos que desencadenan dichos eventos.

Un objetivo colateral que se plantea es aportar diferentes soluciones infraestructurales, con el fin de mejorar la situación, minimizar o reducir el efecto de los eventos de rebase. Es decir, se realizará un estudio que concluirá en el diseño de una protección costera.

Con el fin de lograr estos objetivos, a continuación se describe brevemente las tareas a realizar:

Se comienza en el capítulo 2 analizando los eventos de inundación identificados en la zona de interés. Para ello, la metodología empleada se basa en describir los procesos asociados al clima marítimo. Se describe también de manera general dicho clima.

Posteriormente, en el capítulo 3, se reproduce el efecto de la propagación del oleaje hasta la costa a través de una aproximación numérica. Como último paso del análisis, se simulan diferentes condiciones del clima marítimo y se realiza un diagnóstico.

Para concluir el TFG, en el capítulo 4 se presentan varias propuestas y tras conducir un análisis, de efectividad de las posibles soluciones acompañado de una valoración económica y de impacto ambiental, se realiza la elección de la infraestructura definitiva.

La construcción de la opción ganadora se llevará a cabo en el TFG de la mención de construcción.

Cabe mencionar que en la zona de estudio se construyó en el año 2015 un dique semisumergido (como se detalla en la sección donde se realiza un seguimiento de los acontecimientos). Este dique no se considera a efectos de análisis en este TFG.

2. ANÁLISIS DE LOS EVENTOS IDENTIFICADOS



2.1 Descripción del clima marítimo

2.1.1 Descripción teórica general de los procesos asociados al clima marítimo

En este capítulo se estudian los factores que condicionan el oleaje y nivel del mar, factores relevantes en la determinación de la causa que origina las inundaciones de San Andrés.

2.1.1.1 Nivel del mar

El nivel del mar considera la acción conjunta de la marea astronómica y la marea meteorológica.

Las mareas astronómicas son de carácter determinista y se pueden definir como la oscilación periódica del nivel del mar, inducida por las fuerzas gravitacionales que actúan sobre las partículas de agua. El estudio de este tipo de mareas puede realizarse desde tres perspectivas diferentes:

1. Teoría de equilibrio de Newton: mediante la que se estudian principalmente las fuerzas generadoras de las mareas.
2. Teoría dinámica: estudian las mareas mediante la resolución de las ecuaciones generales de la hidrodinámica.
3. Análisis armónico: se basa en el estudio y análisis de las componentes periódicas de la marea.

Si realizamos la descripción de las mareas según la teoría de Newton, debemos considerar los siguientes factores, que afectan tanto a las mareas como a su amplitud:

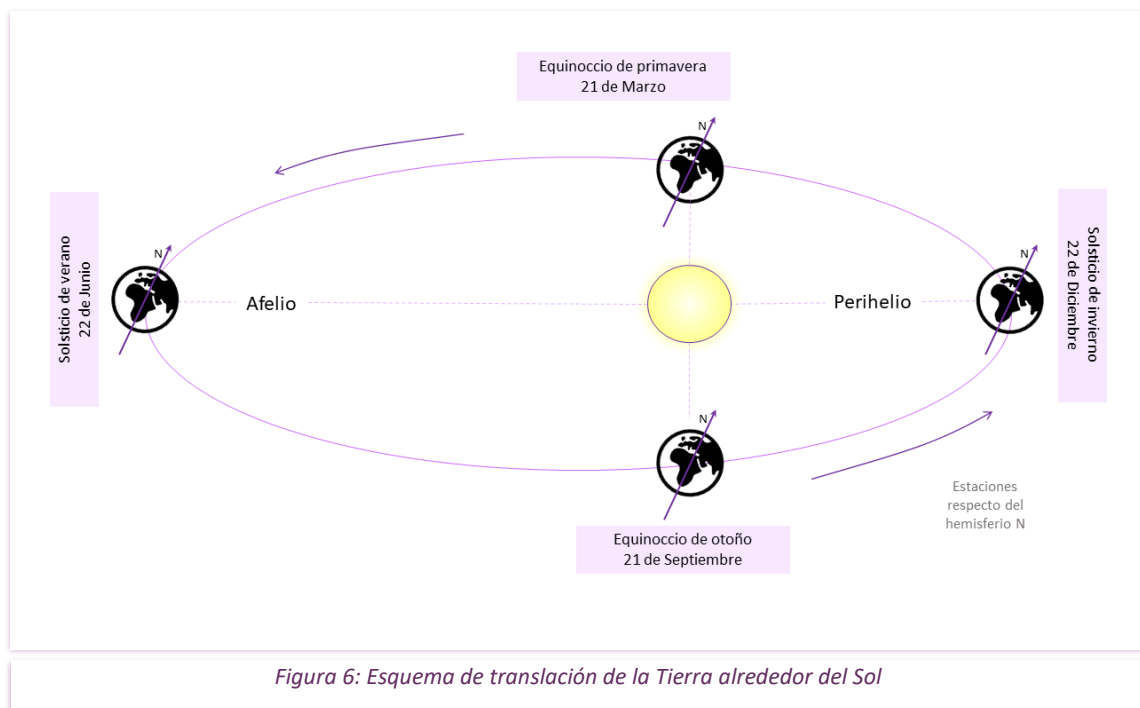
- El eje de la Tierra está inclinado 23.5° respecto de la perpendicular al plano de la eclíptica y esto hace que el ángulo formado por el plano ecuatorial y el plano de la eclíptica varíe en $\pm 23.5^\circ$ a lo largo del año. Esta declinación da lugar a los siguientes tipos de mareas, clasificándolas según la frecuencia de las bajamares y pleamares.
 - Mareas semidiurnas: se dice de aquellas mareas en las que aproximadamente cada 12 horas se produce una marea alta o pleamar en ambos lados (opuestos) de la Tierra. Una de las mareas altas en un punto determinado ocurrirá cuando la Luna se sitúe sobre tal punto, y la otra tendrá lugar cuando la Luna se encuentre en la posición opuesta. Se considera que los ciclos de bajar y pleamar se retrasan entre 40 y 50 minutos al día, debido a que la Luna no completa una vuelta en un día solar (24 horas exactas).
 - Mareas diurnas: estas mareas son características de las latitudes bajas. En estas mareas un único ciclo de marea tiene lugar, es decir, una bajar y una pleamar en el transcurso del día Lunar. La duración del ciclo es por tanto de 24h 50min.
 - Mareas mixtas: este tipo de mareas pueden encontrarse clasificadas según diferentes criterios dependiendo del autor. Podemos diferenciar entre mareas mixtas principalmente semidiurnas o mareas mixtas principalmente diurnas. Las primeras se caracterizan por contar con dos mareas altas y dos bajas cada día Lunar, pero con marcadas desigualdades en altura e irregularidades en el espaciado. Las de predominio diurno se conocen por provocar en unas ocasiones dos mareas altas y mareas bajas desiguales con un espacio irregular

durante un día Lunar, y en otras ocasiones solo una pleamar y una bajamar en el transcurso de un día.

- La órbita de la Luna alrededor de la Tierra es elíptica, por lo que la distancia entre la Tierra y la Luna no es constante. Como dato característico de esta trayectoria, la Luna tarda en completar una vuelta alrededor de la tierra 27 días 7 horas y 43 minutos.
- La órbita de la Tierra alrededor del Sol es elíptica, por lo que la distancia entre la Tierra y el Sol no es constante.

Debido a las distancias variables entre los tres astros, Tierra, Sol y Luna, tendrán lugar los siguientes fenómenos:

- Cuando la Luna está en su punto más cercano a la Tierra, se conoce como perigeo y cuando está más alejado está en apogeo.
- Cuando la Tierra está situada en su posición más lejana al Sol, se dice que se encuentra en su posición de afelio. En esta época, el hemisferio Norte estará más cerca del Sol, y será verano, en consecuencia, regiones del hemisferio Sur estarán más alejadas y será invierno.
- La posición en la que el hemisferio Sur se sitúa más cercano al Sol se conoce como perihelio. En esta posición, será invierno en el hemisferio Norte y verano en el hemisferio Sur.
- Además, el perihelio y el afelio ocurren en los días conocidos como solsticios. Las fechas son 22 de diciembre y 22 de junio respectivamente. En los solsticios los rayos del Sol caen sobre los trópicos, sobre el de Cáncer en el solsticio de verano y sobre el de Capricornio en el de invierno (respecto del hemisferio Norte).
- En los equinoccios, 21 de marzo el de primavera y 23 de septiembre el de otoño (respecto de las estaciones en el hemisferio Norte), los rayos del sol caen





exactamente sobre el Ecuador y en estas dos posiciones de la órbita terrestre es cuando la Tierra se sitúa más cerca del Sol.

La posición relativa de los tres astros dará lugar a las mareas vivas o sicigias y a las mareas muertas o de cuadratura.

Las mareas vivas o sicigias suceden cuando la Luna, la Tierra y el Sol están alineados. Ocurren cuando la Luna se encuentra en su fase llena o nueva. Estas mareas provocan máximos niveles de elevación de la superficie del agua, debido a que las fuerzas de atracción ejercidas sobre la masa de agua por ambos astros, Luna y Sol se suman. Por tanto, se producen pleamares de mayor valor, y bajamares más bajas que de promedio. Cuando la Luna se encuentra entre la Tierra y el Sol, las mareas se conocen como mareas de conjunción, y cuando la Tierra se encuentra entre la Luna y el Sol, se llaman mareas de oposición.

Dentro de las mareas de sicigia, hay dos mareas con valores máximos que son las que se producen en los equinoccios de otoño y primavera, es decir, cuando el Sol y la Luna se encuentran sobre el plano del Ecuador. Debe tenerse en cuenta que, a mayor amplitud de marea, corresponden también mayores corrientes por el mayor volumen de agua a trasladarse en el mismo tiempo.

En cuanto a las mareas muertas o de cuadratura, tienen lugar cuando el Sol y la Luna forman un ángulo perpendicular con el centro de la Tierra. En esta situación, la Luna se encuentra en su fase creciente o menguante. En este caso, las fuerzas ejercidas sobre la masa de agua se restan por lo que la atracción de la Luna se ve disminuida por el efecto del Sol, y se producen mareas de menor magnitud a las mareas promedio. En consecuencia, serán también menores las corrientes por ser menor el volumen de agua a trasladarse en el mismo tiempo. Se estima que el efecto producido por la fuerza de atracción del Sol es el 46% de la fuerza de atracción de la Luna.

Por otro lado, y reparando en el rango de amplitud de la marea, estas pueden ser clasificadas como:

- Rango o amplitud micromareal: cuando la distancia entre el límite de marea alta y marea baja es menor a 2 metros.
- Rango o amplitud mesomareal: cuando la distancia entre el límite de marea alta y marea baja es de entre 2 y 4 metros.
- Rango o amplitud macromareal: cuando la distancia entre el límite de marea alta y marea baja es mayor a 4 metros.

Si se aborda el estudio de las mareas desde la perspectiva del análisis armónico, se deben observar las componentes armónicas de la marea. Actualmente, y a efectos de este TFG, el análisis armónico es el método más práctico para el estudio de la marea astronómica. Este estudio se basa en la descripción de las mareas mediante un número de componentes armónicas cuyos periodos han sido previamente establecidos y coinciden con los periodos de algunos de los movimientos relativos entre la Luna, el Sol y la Tierra.

Por tanto, para realizar el estudio de las mareas mediante el análisis armónico es necesario primero descomponer la marea en sus componentes astronómicas y componente meteorológica. Luego, ha de descomponerse la marea astronómica en sus diferentes

componentes armónicas. Finalmente, se realiza la selección de los armónicos principales en el fenómeno a estudiar. La marea se expresa como la suma de los armónicos según la siguiente expresión.

$$\xi_{MA}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega_i t + \alpha_i)$$

Donde:

a_0 representa el nivel medio del mar (m).

a_i representa la amplitud de la onda del componente i (m).

ω_i representa la frecuencia de la onda componente i (s^{-1}).

α_i representa el desfase de la onda componente.

t representa el instante en el que se calcula la marea o elevación de la superficie (s).

N es el número de componentes armónicas consideradas.

Los constituyentes básicos de las mareas en el análisis armónico de estas son:

Símbolo	Periodo (horas)	Descripción
M₂	12.42	Constituyente principal, mareas semidiurnas, debido al efecto de la Luna
S₂	12.00	Constituyente principal, mareas semidiurnas, debido al efecto del Sol
N₂	12.66	Debido a la variación de la distancia entre la Tierra y la Luna
K₂	11.97	Debido a los cambios de declinación del Sol y la Luna
K₁	23.93	Solar-Lunar
O₁	25.82	Constituyente principal, mareas diurnas, debido al efecto de la Luna
P₁	24.07	Constituyente principal, mareas diurnas, debido al efecto del Sol

Tabla 2: Constituyentes armónicos principales de las mareas

A estos constituyentes se pueden añadir muchos más, pero los descritos son los que habitualmente se catalogan como principales.

Según la clasificación anteriormente comentada, las mareas pueden encasillarse dependiendo de la frecuencia de pleamares y bajamares. Se diferenciará por tanto entre, mareas semidiurnas, mixtas o con predominio semidiurno, mixtas o con predominio diurno y mareas diurnas. Esto se realiza a partir de la amplitud de los principales armónicos diurnos (K_1 y O_1) y semidiurnos (M_2 y S_2), calculando el valor del factor de forma.

$$F = \frac{A_{K_1} + A_{O_1}}{A_{M_2} + A_{S_2}}$$

La marea será de tipo semidiurno ($F \leq 0.25$), marea mixta con predominio semidiurno ($0.25 < F < 1.5$), marea mixta con predominio diurno ($1.5 < F < 3$) y marea diurna ($F \geq 3$).



Finalmente, ha de mencionarse que las mareas pueden verse afectadas por otros factores como los movimientos tectónicos de la corteza terrestre o el calentamiento de aguas y el calentamiento global.

2.1.1.2 Relación entre el registro histórico de inundaciones y los factores del oleaje

Las inundaciones antes descritas en el capítulo 1, se localizan especialmente en las fechas tabuladas a continuación. Además, se representan: la fase Lunar para cada una de ellas, la posición de la Tierra relativa al Sol y la posición de la Luna, expresado como la fecha del perigeo más cercano a la fecha de interés.

Fecha	Fase Lunar	Posición relativa Sol	Posición relativa Luna (perigeo cercano)
06/01/2002	50% visible Cuarto menguante	Solsticio invierno - equinoccio primavera	02/01/2002
02/07/2007	98% visible Luna llena - menguante	Solsticio verano - equinoccio otoño	09/07/2007
23/12/2010	97% visible Luna llena - menguante	Solsticio invierno	25/12/2010
14/05/2011	83% visible Creciente - Luna llena	Equinoccio primavera - solsticio verano	15/05/2011
30/08/2011	1% visible, Luna nueva - creciente	Solsticio verano – equinoccio otoño	30/08/2011
18/06/2012	2% visible Menguante - Luna nueva	Solsticio verano	01/07/2012
27/08/2014	2% visible Luna nueva - creciente	Solsticio verano – equinoccio otoño	08/09/2014

Tabla 3: Relación de eventos de inundación y fases Lunar y solar

Puede advertirse en los valores tabulados anteriormente una clara relación entre la fase Lunar y las inundaciones que tienen lugar en San Andrés. Estas inundaciones ocurren principalmente en las fechas cercanas a las fases de Luna llena o Luna nueva, debido a las mareas vivas causadas por la suma del efecto de atracción de la Luna y el Sol sobre la masa de agua.

Existe también una clara relación entre la posición de la Luna respecto de la Tierra, ocurriendo la mayoría de las inundaciones en fechas cercanas al perigeo, posición de la Luna más cercana a la Tierra.

A su vez, la marea meteorológica es de tipo aleatorio y se define como la oscilación del nivel del mar inducida por las tensiones tangenciales sobre la superficie de la masa de agua causadas por la acción del viento o inducidas por los gradientes de presión atmosférica. Debido a la modificación que sufre la elevación de la superficie de agua, el análisis armónico no resulta suficiente para determinarla con precisión. Por tanto, la marea meteorológica es conocida como la diferencia entre la elevación pronosticada y la realmente medida por el mareógrafo.

Las diferencias entre ambos valores pueden llegar a ser de gran magnitud, especialmente en localidades afectadas por tormentas. Por tanto, es de gran importancia considerar las mareas meteorológicas como componente fundamental del nivel del mar al estudiar eventos de inundación. Este componente es más conocido como *storm surge*.

El valor de la sobreelevación meteorológica puede ser tanto positivo como negativo (causando una depresión de la superficie en este caso), siendo las primeras más frecuentes y generalmente de mayor amplitud. Además, en lo que a la ingeniería civil e ingeniería de costas respecta, serán de mayor interés, pues las sobreelevaciones de la superficie son las que causan el rebase de las infraestructuras.

La presión atmosférica induce cambios en el nivel del mar a través del mecanismo del barómetro invertido. Este mecanismo es equivalente a decir que, cuanto mayor sea la presión atmosférica, mayor será la presión ejercida sobre la superficie libre de agua y por tanto, mayor será la depresión causada. En cambio, a menores presiones atmosféricas, menor será la presión ejercida sobre la superficie de agua, y en consecuencia mayores serán los valores de sobreelevación.

En cuanto al efecto del viento se refiere, la acción prolongada del viento sobre la lámina de agua en dirección a la costa puede inducir a un aumento en el nivel medio del mar denominado *wind set-up*. Esta elevación depende tanto de la duración del viento como de su intensidad, el contorno de la costa y diferentes características del fondo, por ejemplo, su rugosidad.

La importancia relativa de los dos causantes de la marea meteorológica depende directamente del tipo de costa donde se esté realizando el análisis. En zonas muy someras, el efecto del viento es dominante sobre el efecto de los gradientes de presión. Sin embargo, en el caso de la mayoría de las costas españolas, caracterizadas por la presencia de una estrecha plataforma, el efecto del barómetro invertido es el predominante.

2.1.1.3 Mar de fondo y mar de viento

Con el fin de describir en que se basa el fenómeno de mar de fondo, es necesario definir primero qué son las olas.

Las olas son ondas que tienen lugar sobre la superficie del agua y que se originan por el rozamiento del viento sobre dicha superficie. En este proceso, el viento ejerce un empuje sobre la superficie de agua que hace que esta se rice creando pequeñas ondulaciones. A su vez, las ondulaciones presentan una mayor oposición frente al viento, que hace que se transformen en olas cada vez mayores. Por tanto, este proceso provoca que cuanto mayor es el tamaño de la ola, mayor sea el empuje o fuerza ejercida por el viento sobre ella. El oleaje total medido en un punto está compuesto por la superposición del mar de fondo y el de viento.

En cuanto al mar de fondo, conocido también como *swell*, mar tendida o mar de leva, es un oleaje que se propaga fuera de la zona de influencia del viento donde ha sido generado, pudiendo propagarse hasta lugares muy lejanos. Por tanto, el mar de fondo no depende de las condiciones del viento en la ubicación donde se está midiendo la elevación de la superficie, sino de las condiciones de viento en otra área distinta.



El mar de fondo al llegar a una localización es un oleaje de tipo regular. En estas olas, la longitud de onda es mucho mayor que la altura de la ola y presentan crestas redondeadas que pueden ser representadas por una función sinusoidal. Las ondulaciones del mar de fondo son paralelas entre sí y están bien organizadas. Estas olas pueden agruparse en trenes de ondas regulares, que avanzan en una única dirección, ya que las olas irregulares más cortas (olas de viento) son poco a poco atenuadas y eliminadas al propagarse a una velocidad menor. En aguas abiertas (como en el caso de estudio, en el océano Atlántico), es fácil encontrar mar de fondo. En caso de confluir dos mares de fondo al mismo tiempo, con direcciones y periodos diferentes, se llama mar de fondo 1 al mar de fondo al de mayor energía, y mar de fondo 2 al de menor energía. El periodo (duración que separa la ola precedente de la anterior) habitual de las olas de fondo se sitúa entre los 15 y 30 segundos.

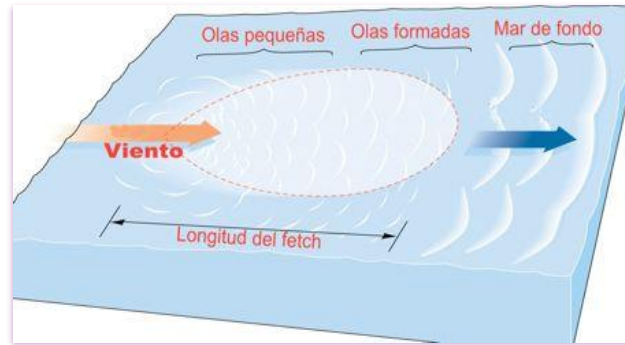


Figura 7: Esquema de creación del swell

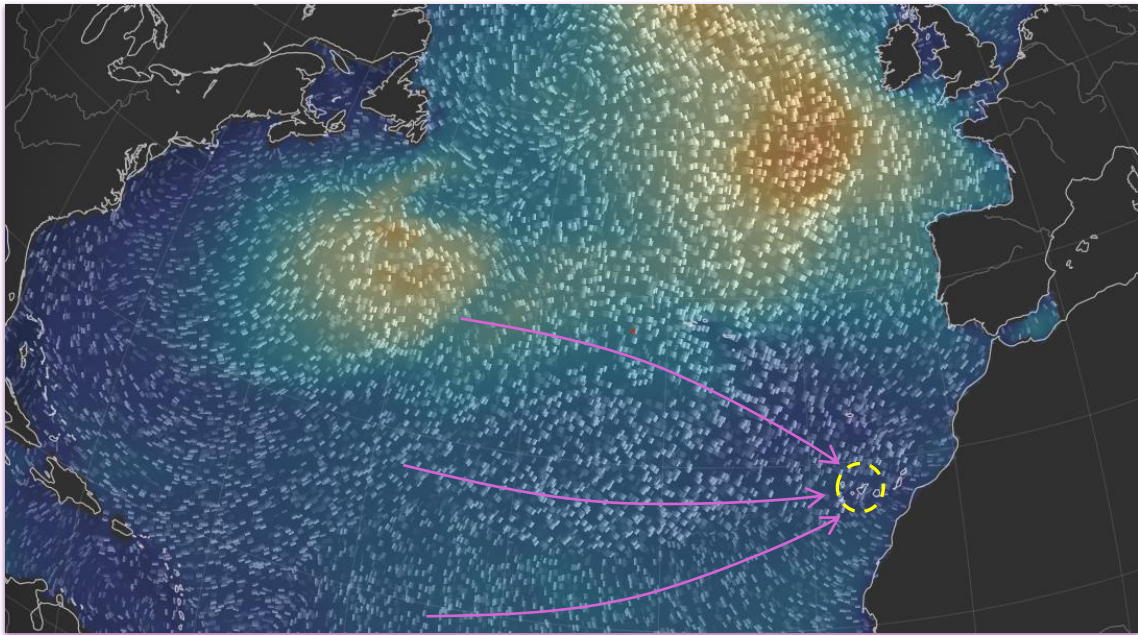
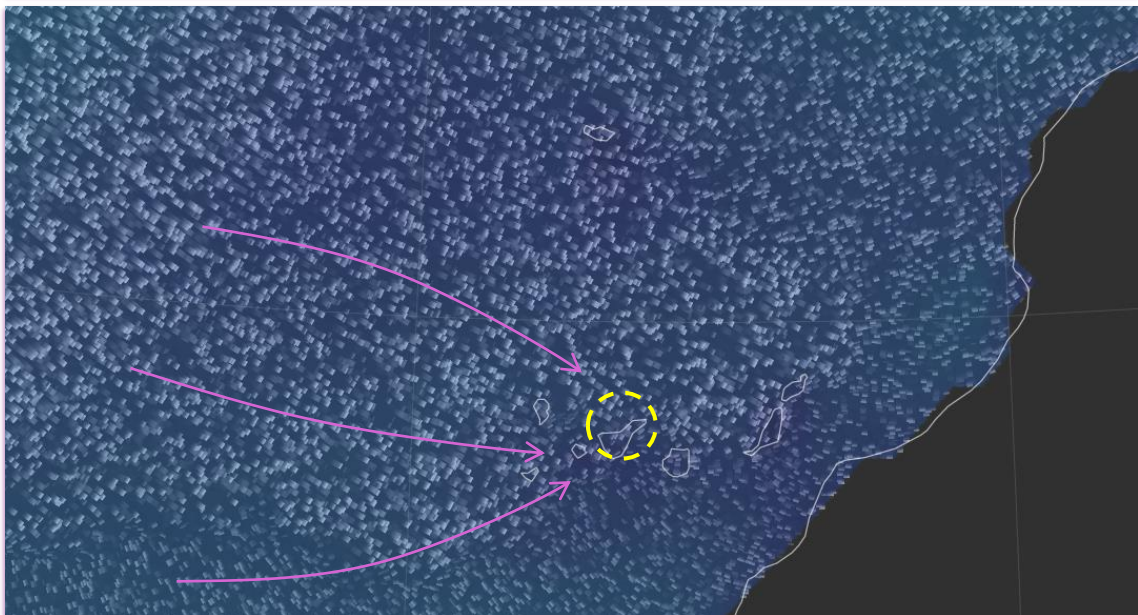
Como información adicional, el mar de viento es el oleaje irregular, de periodos cortos que es generado por el viento que sopla sobre la superficie de agua en un lugar específico, *in situ*. El mar de viento puede reconocerse habitualmente por la espuma que se forma en la zona de la cresta de la ola. Las olas de viento son aquellas que llegan a la costa sin tiempo para ordenarse y por tanto se entienden como un oleaje más caótico que el causado por mar de fondo.

Los factores principales de los que depende la formación de las ondas superficiales del mar son:

- La fuerza del viento.
- Tiempo durante el que sopla el viento.
- Distancia a lo largo de la cual sopla el viento sin que las olas formadas encuentren obstáculos. Esta distancia es también conocida en inglés como *fetch*.

Una costa cercana, por ejemplo, en lugares como el mar Mediterráneo, limita la longitud del *fetch* y por tanto las olas tenderán a ser de un tamaño menor. En el caso de estudio, el Atlántico no limita la longitud del *fetch*, y por tanto, el tamaño de las olas depende de la fuerza del viento producido por una lejana depresión atmosférica. Específicamente, en las Islas Canarias se registran *swells* generados por borrascas en el Atlántico Sur (a unos 7000 km de distancia). Puede verse este fenómeno en las imágenes mostradas a continuación.

Es importante realizar un estudio del mar de fondo que afecta a una localidad, debido a que estas olas pueden ejercer un empuje considerable sobre rompeolas o estructuras costeras similares, dando lugar a destrozos o inundaciones.

*Figura 9: Mar de fondo en las Islas Canarias**Figura 9: Mar de fondo en las Islas Canarias (detalle)*

2.1.1.4 Ondas infragravitatorias

Las ondas infragravitatorias, también conocidas como ondas de baja frecuencia u ondas largas, se caracterizan por tener un periodo de entre 30 y 300 segundos. Las ondas infragravitatorias se entienden como oscilaciones secundarias asociadas a la grupalidad del oleaje de viento. Esta grupalidad ocurre de forma natural, debido a que el oleaje tiende a viajar en conjuntos alternos de pequeña y gran amplitud. Por tanto, el seno de la onda infragravitatoria está asociado al grupo de olas de mayor amplitud, mientras la cresta está asociada al grupo de olas de menor amplitud. Las ondas largas representan una fracción pequeña de la energía asociada al oleaje en



aguas profundas e intermedias. Sin embargo, cuando el tren de oleaje se propaga en aguas someras o poco profundas, las ondas infragravitatorias incrementan considerablemente su energía. Este incremento de energía controla el máximo ascenso y descenso de la lámina de agua en playas y estructuras costeras. Por tanto, las ondas largas pueden entenderse como ondas que modifican la elevación de la superficie de agua sobre las cuales se propagan las ondas cortas u olas de viento. Por todo ello, debe de considerarse el ascenso de la elevación del nivel del mar causado por ondas largas al realizar estudios de inundabilidad.

Se representa en la imagen adjunta la sobreelevación o depresión del nivel medio del mar debido a la relación entre oleaje de viento (en color azul) y olas infragravitatorias (color rojo).

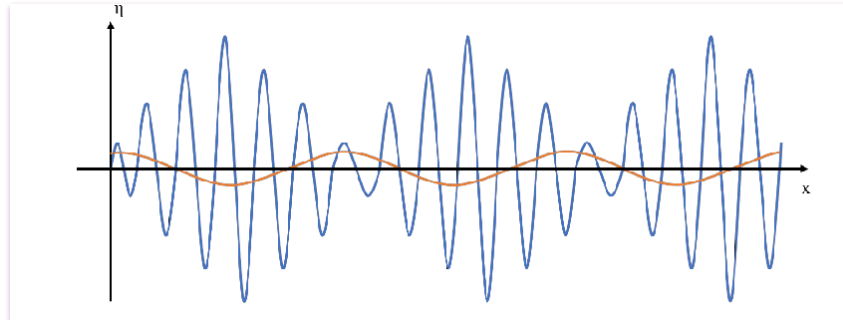


Figura 10: Relación entre oleaje de viento (azul) y olas infragravitatorias (rojo)

2.1.1.5 Procesos físicos de transformación del oleaje

Durante la evolución del oleaje se pueden producir diferentes procesos de transformación de este. En este apartado se estudian brevemente estos procesos, debido a que pueden modificar el valor de altura de las olas y nivel medio del mar, y por tanto contribuir a los eventos de inundación de San Andrés.

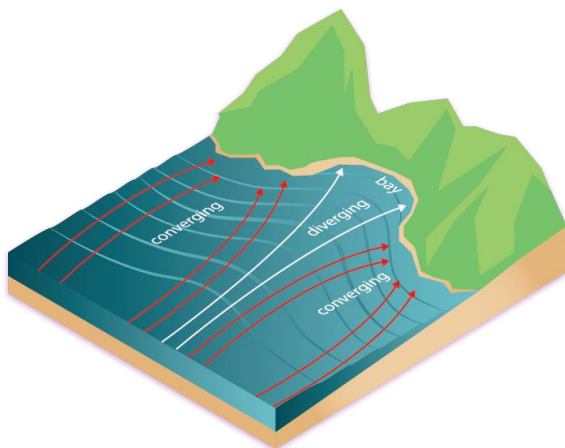


Figura 11: Modelo de refracción del oleaje

El asomeramiento o *shoaling* se entiende como el incremento de la altura del oleaje que ocurre debido a la variación de profundidad del fondo sobre el cual se están propagando las olas. Se produce principalmente por el principio de conservación de energía. Cuando los grupos de olas se aproximan a la costa, su celeridad disminuye. Por tanto, y con el objetivo de que el flujo de energía se mantenga constante si la celeridad disminuye, la altura de las olas debe aumentar. Este principio puede entenderse como un equilibrio entre la energía cinética y energía potencial de las olas. Se conoce como refracción el cambio en la dirección de propagación del oleaje que ocurre cuando una

ola se propaga sobre un fondo que varía su profundidad a lo largo del frente de la ola. Como se ha mencionado anteriormente, la velocidad de propagación del oleaje es proporcional a la profundidad. Por tanto, la sección del frente que se encuentra a mayor profundidad se propaga a mayor velocidad que aquella sección que está a menor profundidad. La refracción provoca que

el oleaje se coloque paralelo a las líneas batimétricas. En cuanto a la conservación de la energía, la energía se mantiene constante entre los rayos de olas (líneas perpendiculares a los frentes) y por tanto se dará que la energía se disipa en las bahías y se concentra en los cabos.

Cuando la propagación del oleaje se interrumpe por un objeto, se produce una transformación en la propagación de las olas conocida como difracción. Para que ocurra este fenómeno, las dimensiones del objeto deben de ser iguales o mayores a la longitud de onda. La difracción ocurre principalmente cuando el oleaje se encuentra con diques o estructuras similares. Esto provoca que detrás de la estructura se genere una zona de “sombra” ya que el oleaje no se propaga a través del objeto. A su vez, las olas que se propagan a los laterales del objeto irradian energía hacia la zona en sombra y debido a la aparición de un gradiente por diferencias en la elevación de la superficie a lo largo del frente de la ola, las crestas giran en esa dirección.

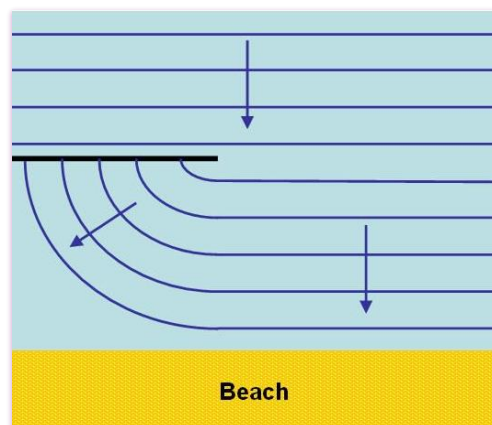


Figura 12: Modelo de difracción del oleaje

De manera similar, cuando el oleaje choca con un obstáculo, que puede ser tanto artificial como natural, ocurre el fenómeno de reflexión, alterando así las características de la ola. La reflexión es el proceso en el cual parte de la energía no disipada de un determinado tren de olas genera otro tren de olas en sentido contrario al incidir sobre una estructura. El fenómeno de reflexión puede cambiar por completo el oleaje incidente, dando lugar a cambios en el nivel de energía de las olas, modificando el modelo de transporte de sedimentos o causando desplazamientos en la zona de rompientes. Por ello, si se quiere determinar la morfodinámica y estabilidad de una zona, es de gran importancia definir el campo de ondas frente a una estructura reflejante artificial o natural. La importancia de ello se debe principalmente a las corrientes de retorno inducidas por la reflexión. Siendo estas corrientes las que avanzan en dirección costa afuera.

En el estudio de la reflexión existen dos casos opuestos. El primero se presenta cuando el oleaje se encuentra un obstáculo vertical impermeable, que causa una reflexión casi pura, no dando lugar a los procesos de disipación o rotura. Por otro lado, el segundo caso ocurre cuando el oleaje se propaga sobre una superficie permeable. Esto provoca la disipación gradual de energía. En este caso, se puede considerar que la reflexión es despreciable frente a fenómenos de disipación o rotura.

Finalmente, el último proceso a mencionar es el de rotura de las olas. Este proceso ocurre cuando la altura de la ola crece hasta ser aproximadamente el 80% del calado. Esto se debe a que la velocidad de las partículas de agua en la cresta de la ola es mayor que la velocidad de la propia ola, provocando así inestabilidad en la zona de la cresta. Esta inestabilidad, causa el colapso de la ola, comúnmente conocido como rotura. Dependiendo del tipo de playa y oleaje se distinguen tres tipos de rotura: *spilling*, *plunging* y *Surging*. Los distintos tipos de rotura se distinguen mediante el parámetro de Iribarren en rotura.



2.1.2 Fuentes de información disponible

En este apartado se describen las bases de datos que se han empleado para realizar la descripción del clima marítimo en San Andrés. Dichas bases de datos se emplean tanto para conocer el clima marítimo en aguas profundas, que seguidamente se propaga a aguas someras, como para conocer las características generales de la batimetría de la zona de estudio.

Una óptima comprensión de las bases de datos es fundamental puesto que son la base del trabajo realizado a continuación.

2.1.2.1 Datos de partida

El Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria) es generador y aporta los datos meteo-oceanográficos a través de su plataforma informática denominada IHData. Este servicio está orientado a transferir y analizar datos meteorológicos oceánicos con fines tanto de investigación como comerciales. Las principales variables contenidas en esta base de datos son el oleaje, el viento y el nivel del mar. Todos los datos proporcionados han sido calibrados y validados con mediciones instrumentales. IHData comprende las siguientes bases de datos:

- Series GOW: Global Ocean Waves.
- Series DOW: Downscaling Ocean Waves.
- Series GOT: Global Ocean Tide.
- Series GOS: Global Ocean Surge.

Por lo tanto, a continuación se presenta una breve descripción de cada una de las series de datos empleada en el estudio.

En cuanto a oleaje de viento se refiere, realizar un análisis numérico de las olas se ha convertido en una valiosa fuente de información para la caracterización del clima marítimo. Ya que, proporciona información que complementa, tanto en tiempo como en espacio, las mediciones instrumentales realizadas por boyas o satélites.

La serie GOW es una reconstrucción histórica de las olas generadas a partir del modelo espectral *WaveWatch III*, desarrollado por la agencia NOAA-NCEP. Este modelo es aplicable a grandes escalas espaciales fuera de la zona de Surf. Las parametrizaciones de los procesos físicos incluyen el crecimiento y la descomposición de las olas debido a la acción del viento, interacciones resonantes no lineales, disipación y fricción del fondo.

Por otro lado, la serie DOW es una reconstrucción histórica de las olas costeras. Para obtener datos de olas en aguas poco profundas (aguas someras cercanas a la costa) y debido a la escasez de mediciones, las bases de datos deben aumentar la resolución espacial para ser capaces de simular los diferentes procesos de transformación de las olas. La serie DOW cuenta con un enfoque híbrido, pues para aumentar la resolución espacial se combina un *downscaling* dinámico con uno estadístico. El primero es adecuado al analizar series de tiempo extensas de una alta resolución espacio-temporal. El segundo a su vez es de fácil implementación y reduce el esfuerzo computacional.

El nivel del mar se puede definir como la combinación de la marea astronómica y la meteorológica. Consecuentemente, las series de datos relacionadas con el nivel del mar pueden clasificarse en dos grupos principales. La serie GOT proporciona información sobre la marea astronómica y la serie GOS sobre la meteorológica.

La serie GOT se genera utilizando constantes armónicas derivadas del modelo de mareas globales TPXO. En esta base se consideran 8 constituyentes armónicos primarios, 2 constituyentes de periodo largo y 3 no lineales. La base de datos proporciona datos globales aplicables a cualquier localización. En España, las constantes armónicas empleadas en este modelo, se ajustan con los datos obtenidos de los mareógrafos del OPPE (Organismo Público Puerto del Estado).

Finalmente, la serie GOS es un conjunto de datos de mareas meteorológicas, producidas por la velocidad del viento y los gradientes de presión atmosférica. La GOS del Sur de Europa tiene una resolución temporal horaria y resolución espacial de $1/8^\circ$ (≈ 30 km).

2.1.2.2 Revisión de la fuente de datos EMODnet

La Red Europea de Observación y Datos Marinos (*The European Marine Observation and Data Network*, EMODnet) está financiada por la Unión Europea en virtud del Reglamento 508/2014 del Parlamento Europeo y del Consejo del 15 de mayo de 2014, sobre el Fondo Europeo Marítimo y de Pesca.

Los productos de batimetría se han obtenido tras combinar estudios batimétricos realizados por organizaciones públicas de investigación. Estos datos han sido sometidos a un control de calidad y posteriormente utilizados para producir Modelos Digitales de Terreno, MDT (*Digital Terrain Models*, DTM) a nivel regional.

La última versión DTM (2018) tiene una resolución de $1/16^\circ \times 1/16^\circ$ minutos de arco y cada celda de la cuadrícula cuenta con la siguiente información:

- Coordenadas x, y.
- Profundidad mínima de agua.
- Profundidad promedio de agua.
- Profundidad máxima de agua.
- Desviación estándar de la profundidad de agua en metros.
- Número de valores utilizados para la interpolación sobre la cuadrícula.
- Identificación de las células extrapoladas.
- Profundidad promedio del agua suavizada mediante una función *spline*.
- Referencia a la fuente de datos predominante con metadatos.

Los valores del Modelo Digital de Terreno se determinan a partir de 4 posibles fuentes de datos:

- Datos de levantamientos batimétricos: conjunto de datos de alta resolución de levantamientos a los que se hace referencia a través del servicio CDI (*Data Discovery and Access*).
- Datos del modelo digital del terreno: conjunto de datos compuestos producidos y entregados por una serie de proveedores de datos externos, como los Servicios Hidrográficos. Estos datos están basados en levantamientos históricos.
- Datos batimétricos derivados de satélites: conjunto de datos compuestos producidos a partir de imágenes del *LandSat 8*. Se utilizarán principalmente para tramos costeros.
- Datos en cuadrícula GEBCO 2014: datos en cuadrícula de $30''$ que se utilizan para completar la cobertura aérea en caso de falta de datos.



Se acepta, por tanto, que la exactitud y precisión de los datos cuadriculados varían dependiendo de la ubicación. En caso de contar con diferentes datos para una misma celda, el programa los filtra de acuerdo con los criterios de la *EMODnet*.

2.1.3 Batimetría

La batimetría debe ser descrita para estudiar la propagación del oleaje y realizar el estudio de las inundaciones en una localidad, dado que afecta de forma considerable tanto a la formación como propagación de olas.

En el mapa puede verse reflejada la batimetría de la zona de San Andrés.

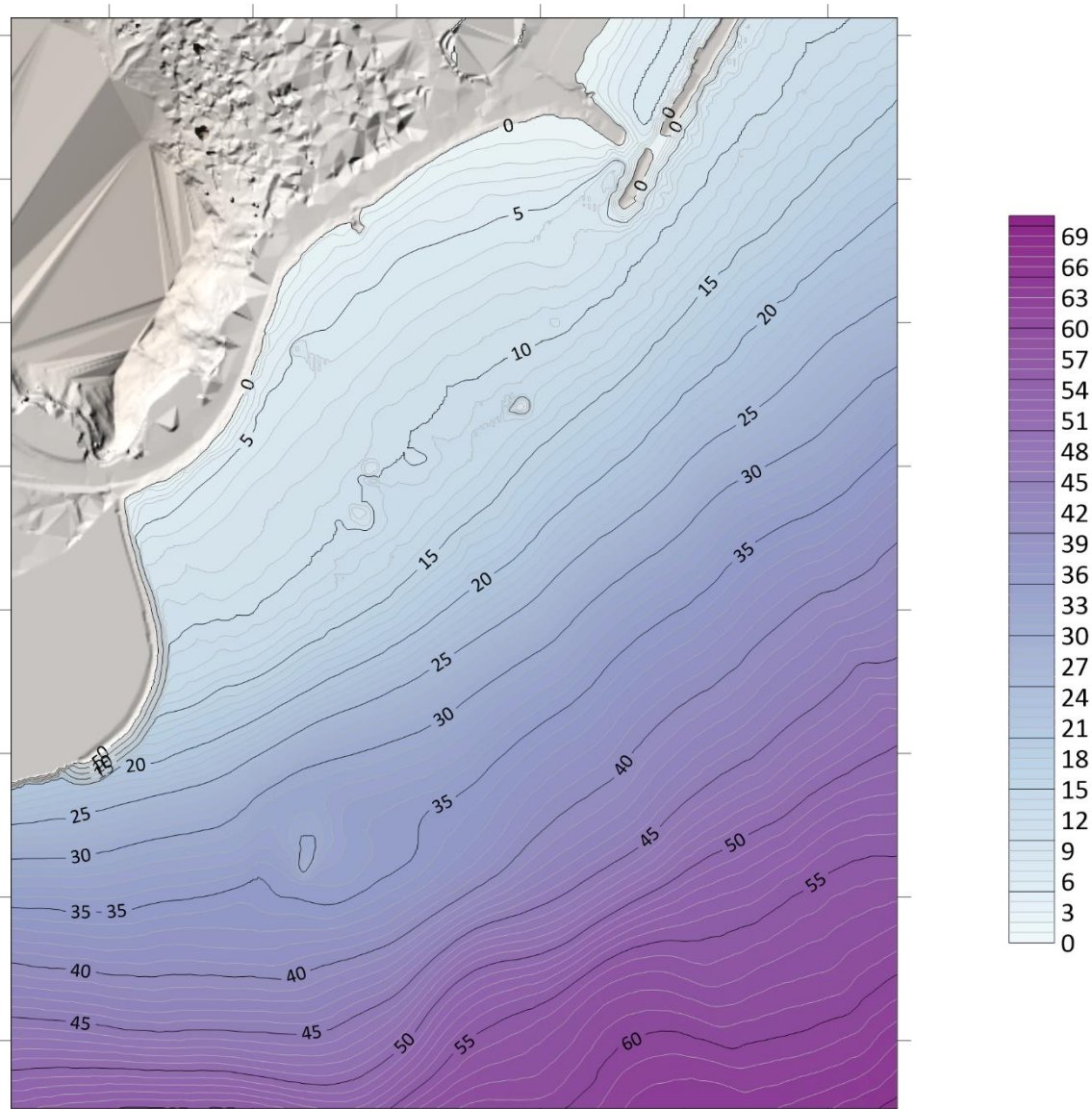


Figura 13: Batimetría de la zona de San Andrés

Como puede observarse, los frentes del fondo marino de San Andrés son rectos y paralelos entre sí. Estos tienen una orientación de nivel ascendente en dirección Noroeste. Además, no existe ningún accidente natural relevante en la zona, por lo que la pendiente es uniforme a lo largo de una amplia distancia. Por otra parte, en la parte superior derecha de la figura puede verse el dique semisumergido de escollera situado frente a la playa de las Teresitas. En el lado inferior izquierdo se ubica la protección de forma curva de la dársena pesquera. Ambos

elementos son de gran relevancia, debido a los procesos de transformación de la propagación del oleaje que provocan. Los cambios más importantes para el estudio son: la refracción, la reflexión y la propagación longitudinal a lo largo de la costa.

Por lo expuesto anteriormente, se explica la razón por la cual el oleaje proveniente del Sur y Sureste causa consecuencias de mayor gravedad en el paseo marítimo de San Andrés.

2.2 Descripción general del clima marítimo en la zona de estudio

La descripción general del clima marítimo se aborda realizando: un análisis del clima marítimo general de San Andrés, un análisis estacional y un análisis específico de las fechas en los que ocurren los eventos de inundación identificados en el capítulo 1.

2.2.1 Clima marítimo general

Como se explica en los apartados anteriores, el nivel del mar se compone mayoritariamente de la marea astronómica y la marea meteorológica. Los datos utilizados para el análisis están referidos al nivel de la Bajamar Máxima Equinoccial (BMVE).

Se muestran a continuación de manera gráfica las series de datos del nivel del mar debido a la marea astronómica y el nivel del mar debido a la marea meteorológica a lo largo del tiempo. Se adjunta también la combinación de ambos factores, que da lugar a la elevación final debido a constituyentes mareales del nivel del mar. Con el fin de realizar el análisis con más detalle, se ha representado igualmente un histograma con los valores de altura significativa de ola y periodo pico. Se anexa asimismo una tabla resumen donde se muestran los estadísticos básicos y una rosa de oleaje para caracterizar el clima marítimo general.

La herramienta empleada para realizar el análisis llevado a cabo en este capítulo ha sido MATLAB, y los datos se han extraído de las bases de datos anteriormente descritas.

Como explicación adicional y debido a la importancia de estas variables en este capítulo, se procede a detallar de manera breve el significado de altura significativa de ola y periodo de pico. La altura significativa de ola es la media aritmética del tercio de olas más altas registradas durante un periodo de tiempo en un muestreo. Además, el periodo de pico se entiende como el periodo asociado al pico de energía espectral. Cuanto más regular es el oleaje, más similares son los valores del periodo de pico y período medio, T_p y T_m respectivamente.

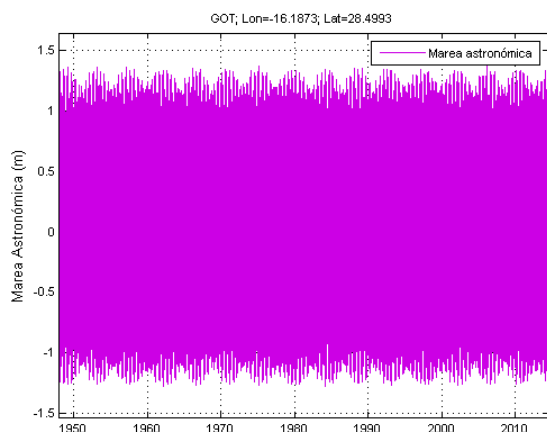


Figura 14: Representación de la Marea Astronómica

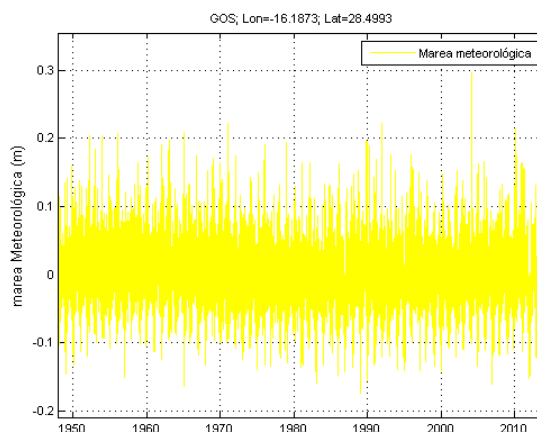


Figura 15: Representación de la Marea Meteorológica

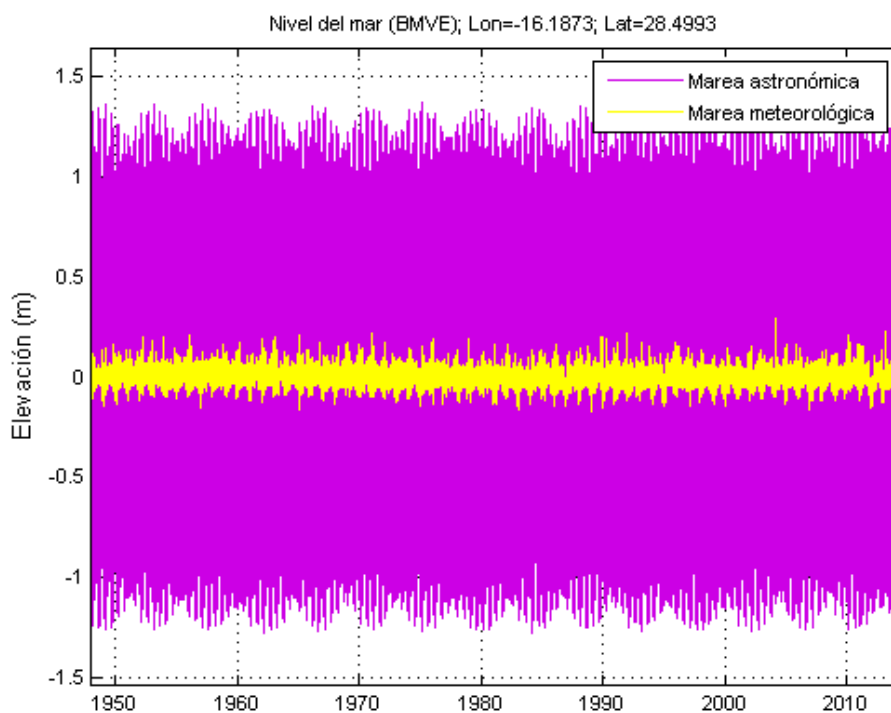


Figura 16: Combinación de la Marea Astronómica y la Marea Meteorológica

En las figuras se observa que las mareas muertas tienen una carrera de entorno a los 2 m y las carreras de las mareas vivas se incrementan hasta un valor cercano a los 2.35 m. Además, se identifica el dominio de la marea astronómica en la definición del nivel del mar, pues es esta la que domina sobre la marea meteorológica. Puede apreciarse que el nivel de la marea meteorológica fluctúa entre un incremento y decremento de unos 20 cm respecto del nivel medio del mar. Igualmente, puede comprobarse cómo la marea astronómica sigue un patrón sinusoidal y cómo la marea meteorológica tiene un carácter aleatorio.

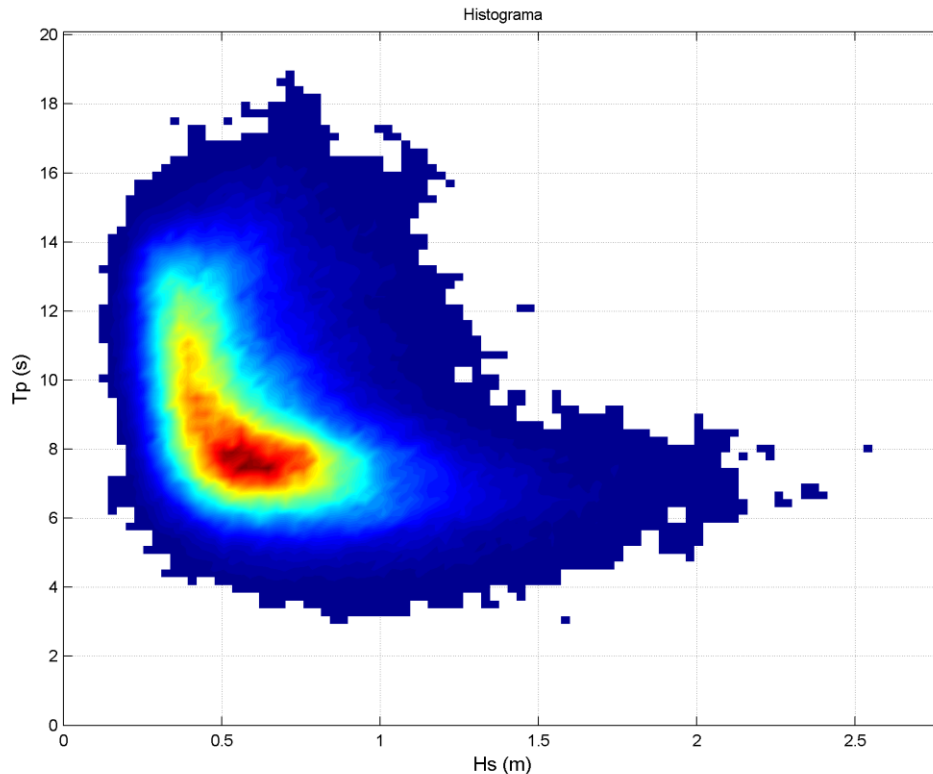


Figura 17: Histograma de altura de ola significativa y periodo de pico

El histograma combina diferentes parejas de altura de ola significativa y periodo de pico y es utilizado para representar la frecuencia con la que cada combinación de altura y periodo tienen lugar. En el histograma, se representan las mayores frecuencias con colores rojizos y las menores frecuencias mediante colores azulados. Cabe destacar que los puntos sin información son interpolados a partir de la información que contienen los puntos adyacentes.

En la figura se advierte cómo existen dos comportamientos muy diferenciados. Por una parte, existen eventos con altos periodos de pico (mayores a 8 s) y pequeña altura significativa de ola (entorno a los 0.5 m). Por otro lado, existen eventos con periodos de pico pequeños (menores a los 8 s) y altura significativa de ola superior (mayores a 0.75 m). El evento de mayor probabilidad de ocurrencia, representado con un color magenta, se caracteriza por combinar periodos de pico entorno a los 8 s y alturas significativas de olas de 0.6 m. La altura de ola máxima registrada está entorno a 2.5 m y el mayor periodo de pico es de 19 s.

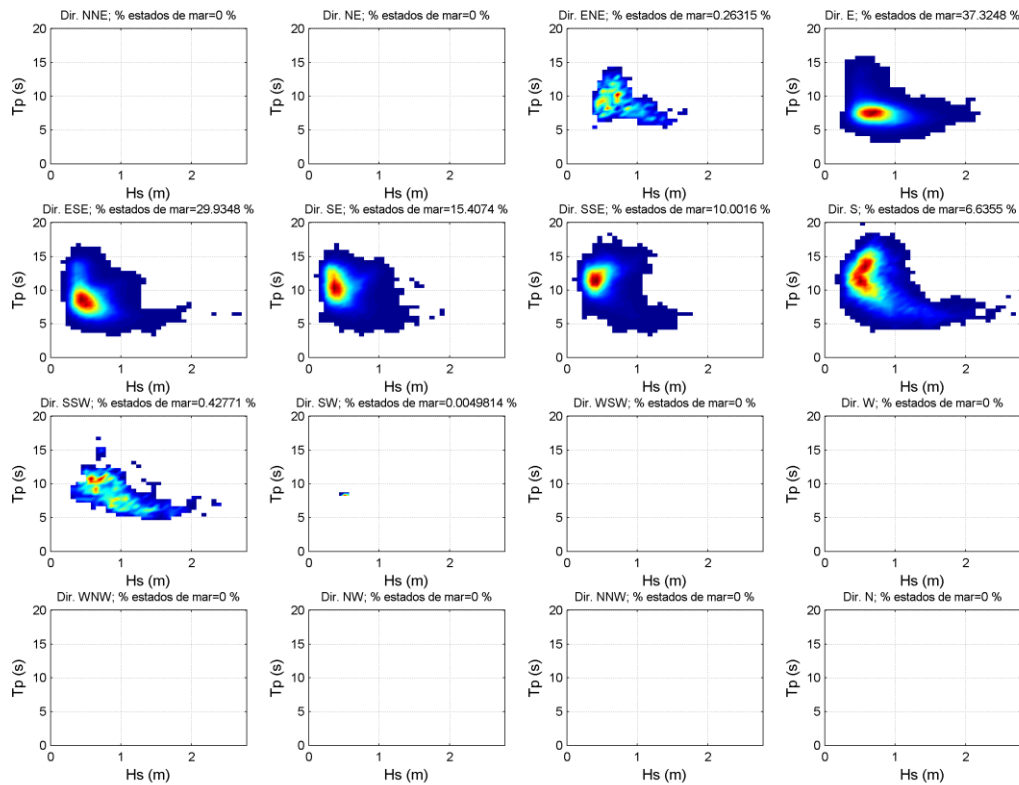


Figura 18: Histograma direccional del clima general

En la figura superior se representan los histogramas de altura significativa de ola y periodos de pico clasificados según las 16 posibles direcciones. Puede observarse que en la localización de interés no existe oleaje de componente Norte, Noreste, Noroeste u Oeste Noroeste, debido a que la probabilidad de ocurrencia se concentra en las direcciones Este, Sureste, Suroeste.

En estos histogramas se representan también los dos comportamientos previamente mencionados, siendo ahora posible distinguirlos según su dirección.

El oleaje que se caracteriza por un bajo periodo de pico ocurre especialmente con oleaje proveniente del Este y del Este Sureste. A su vez, el oleaje caracterizado por un mayor periodo de pico ocurre siguiendo las direcciones Sureste, Sur Sureste y Sur. Cabe destacar que, en cuanto a las alturas de ola, el oleaje de mayor altura ocurre con dirección puramente Sur.

TABLA ESTADÍSTICOS BÁSICOS

Variable medida: Hs; P 1

direcciones(°)	prob.direccion	Hs; P 1 _{50%}	Hs; P 1 _{90%}	Hs; P 1 _{99%}	Hs; P 1 ₁₂
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0026	0.7082	1.2034	1.6055	1.7334
E	0.3732	0.7185	1.0979	1.5164	1.7951
ESE	0.2993	0.5096	0.8074	1.1305	1.4989
SE	0.1541	0.4187	0.7059	1.0484	1.3781
SSE	0.1000	0.4508	0.7147	1.1037	1.4377
S	0.0664	0.6452	1.1279	1.9055	2.3721
SSW	0.0043	0.8701	1.5039	2.2660	2.5601
SW	0.0000	0.5074	0.5874	0.7341	0.7341
WSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
W	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Figura 19: Tabla de estadísticos básicos para el régimen normal

La tabla muestra información estadística sobre la probabilidad de que el oleaje siga una dirección concreta con una altura caracterizada por los percentiles 50, 90 y 99% de altura de ola significativa. Estos percentiles representan la altura de ola que no se excede el 50, 90 o 99% de las veces respectivamente. La última columna muestra la altura de ola que puede asemejarse a la altura máxima, dado que representa la altura que es superada únicamente 12 horas de las 8760 horas anuales.

Mediante estos valores estadísticos puede contemplarse la caracterización del clima marítimo general de San Andrés que se ha venido comentando. Por una parte, la probabilidad de ocurrencia del oleaje se concentra en las direcciones E, ESE y SE. Por otra parte, puede observarse cómo mayores alturas de olas ocurren con un oleaje en dirección Este. No obstante, y aunque la probabilidad de ocurrencia es menor, cabe destacar la elevada altura del oleaje cuando este sigue una dirección puramente Sur.

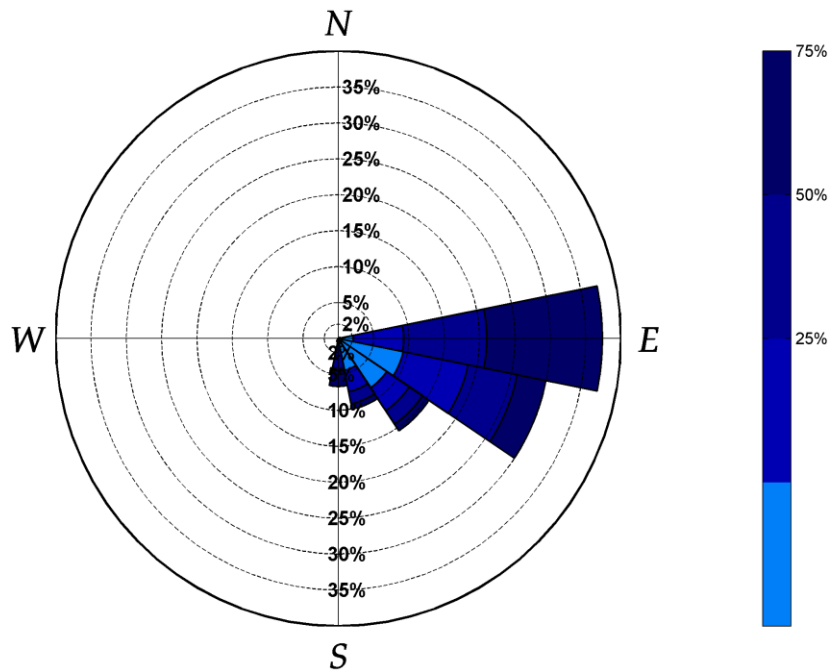


Figura 20: Rosa de oleaje para el régimen medio

La distribución sectorial del oleaje puede caracterizarse también mediante el uso de rosas de oleaje. En este caso, la rosa de oleaje presentada en la figura anterior discretiza los datos en clases de direcciones, alturas de olas y probabilidad de ocurrencia de la combinación de ambas. Cada sector se representa con un brazo en la rosa de oleaje. La longitud de estos brazos es proporcional a la probabilidad de ocurrencia de cada sector, calculada como la frecuencia relativa muestral. La altura de ola se representa respecto a los cuartiles de altura de ola significativa. Las rosas de oleaje son representaciones muy visuales del clima marítimo, debido a que permiten determinar de forma ágil cuál es el sector predominante. Asimismo, la altura de ola permite también determinar qué sector es el más enérgico.

En cuanto al análisis del clima marítimo general de San Andrés, puede claramente percibirse que la dirección predominante es Este, siendo también importante la componente Este Sureste o incluso Sureste. Al mismo tiempo las olas más grandes ocurren en los sectores Este y Este Sureste además de en el sector de dirección puramente Sur.

2.2.2 Clima marítimo estacional

En este apartado se estudia el clima marítimo general de San Andrés en cada una de las estaciones del año, dado que se considera que este podría sufrir una variación dependiendo de las condiciones características de cada una de las estaciones. Este estudio es también de utilidad a la hora de determinar las causas que podrían ser responsables de los eventos de inundación atendiendo a su distribución temporal.

2.2.2.1 Primavera (20 marzo – 21 junio)

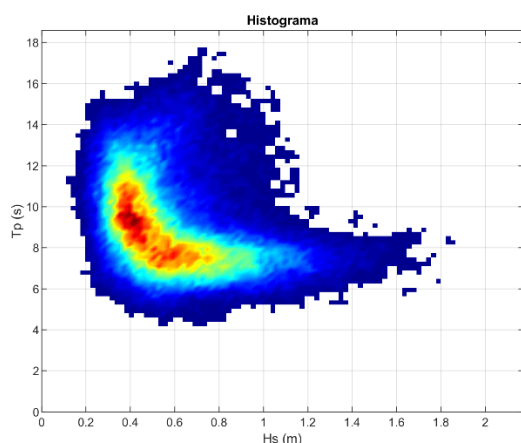


Figura 21: Histograma de la altura de ola significativa y periodo pico en primavera

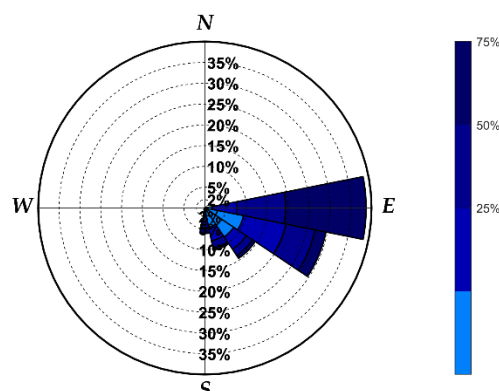


Figura 22: Rosa de oleaje para primavera

En el análisis realizado para primavera, estación comprendida entre el 20 de marzo y 21 de junio, puede verse cómo las direcciones de la mayoría de los registros son E y ESE, siendo la probabilidad de ocurrencia elevada (entorno al 40%) para la dirección puramente Este. El histograma estacional tiene una forma similar al histograma del régimen normal obtenido previamente. En cuanto a los rangos de valores con mayor probabilidad de ocurrencia, los periodos pico se sitúan entre los 7 a 11 s y la altura significativa de ola está en valores entre los 0.3 a 0.7 m, teniendo la máxima recurrencia una altura de ola de 0.4 m.

2.2.2.2 Verano (21 junio – 22 septiembre)

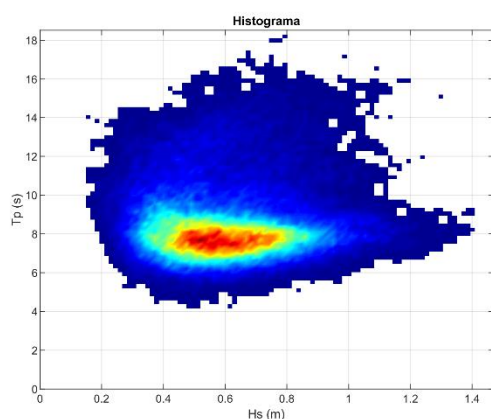


Figura 23: Histograma de la altura de ola significativa y periodo pico en verano

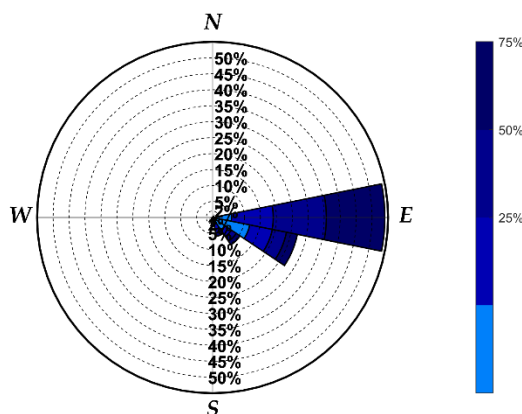


Figura 24: Rosa de oleaje para verano

En el análisis realizado para verano, estación comprendida entre el 21 de junio y 22 de septiembre, puede verse cómo una vez más las direcciones predominantes son E y ESE, no habiendo en este caso ningún registro de componente puramente Sur. Una vez más la



probabilidad de ocurrencia para eventos con dirección puramente Este es elevada, siendo mayor al 50%. En este caso, el histograma se concentra en periodos de pico entorno a los 8 s. Estos periodos se combinan con alturas significantes de olas, ligeramente mayores a las de primavera, pero que oscilan también en el rango de 0.4 a 0.8 m, dándose la mayor ocurrencia en torno a 0.5 m.

2.2.2.3 Otoño (22 septiembre – 21 diciembre)

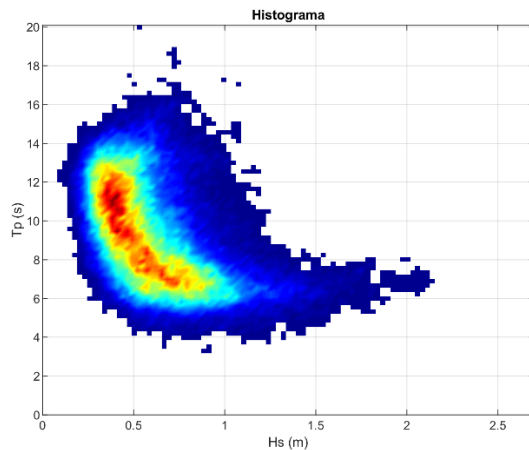


Figura 25: Histograma de la altura de ola significativa y periodo pico en otoño

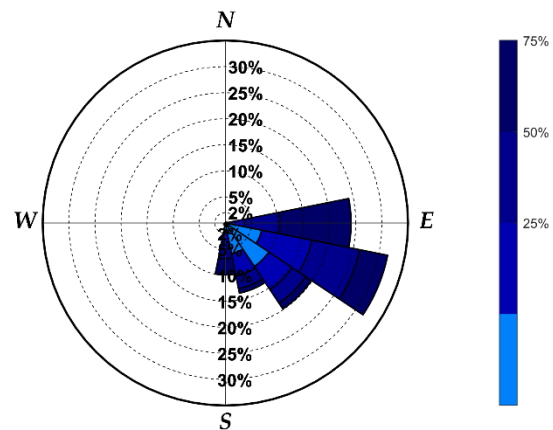


Figura 26: Rosa de oleaje para otoño

En el análisis realizado para otoño, estación comprendida entre el 22 de septiembre y 21 de diciembre, puede verse cómo las direcciones SE y SSE ganan relevancia, reduciéndose así la probabilidad de ocurrencia del oleaje puramente Este. Es de gran importancia asimismo destacar que los percentiles de altura significativa aumentan tanto en la dirección Este como en la dirección Sur. En este caso, aumenta los periodos de pico, colocándose en el intervalo de 6 a 13 s, teniendo la máxima ocurrencia el periodo de pico de 11 s. La altura significativa de ola se sitúa entorno a un valor medio de 0.4 m. Cabe destacar que se registran olas de altura mayor a 2 m.

2.2.2.4 Invierno (21 diciembre – 20 marzo)

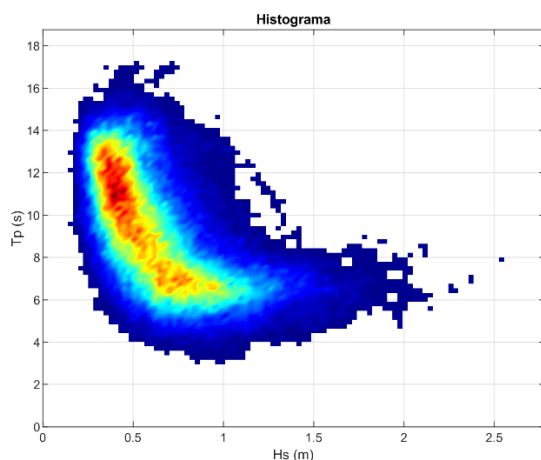


Figura 27: Histograma de la altura de ola significativa y periodo pico en invierno

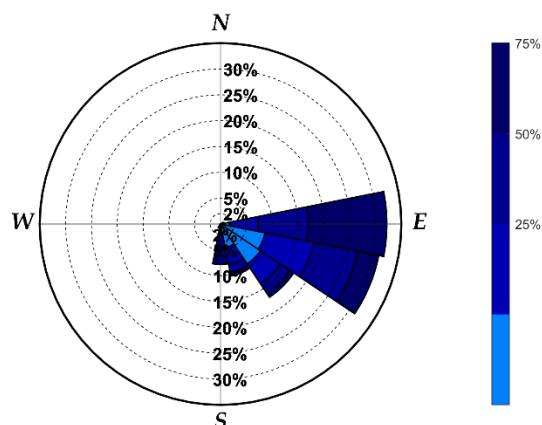


Figura 28: Rosa de oleaje para invierno

En el análisis realizado para invierno, estación comprendida entre el 21 de diciembre y 20 de marzo, puede verse como las direcciones SE y SSE ganan relevancia en comparación al régimen medio. En este caso, aumenta los periodos de pico, colocándose en el intervalo de 9 a 13 s, teniendo la máxima ocurrencia el periodo de pico de 12 s. La altura significativa de ola se sitúa entorno a un valor medio de 0.4 m aproximadamente. Al igual que en la estación de otoño, cabe destacar que se registran olas de altura mayor a 2 m.

2.2.3 Conclusiones del análisis estacional

- En cuanto a la dirección del oleaje, tiene lugar un oleaje de dirección E, SE en primavera, dirección mayoritariamente E durante verano, predominio SE y ESE en otoño y finalmente en invierno, el oleaje se produce en todas las direcciones comprendidas en el cuadrante. Es decir, la importancia de la dirección puramente Este es mínima en otoño. Durante invierno y primavera esta dirección recupera importancia, hasta ser dominante durante el verano.
- En lo que a altura media de ola respecta, puede concluirse que la altura más frecuente es de 0.4 m, no existiendo gran diferencia entre estaciones. Sin embargo, debe de destacarse que, durante las estaciones de otoño e invierno, se registran extremos en los que la altura de ola supera 2.0 m pudiendo llegar hasta máximos de 2.5 m.
- En lo que al periodo pico concierne, es máximo durante las estaciones invernales y otoñales, siendo estos valores aproximadamente de 11 s. Sus valores mínimos se registran durante el verano, donde además cabe destacar su uniformidad.
- Finalmente, puede apreciarse que la forma del histograma de la estación de verano es significativamente diferente a los histogramas del resto de estaciones. La forma redondeada del histograma de verano refleja una menor influencia del mar de fondo o *swell*, que se caracteriza por períodos mayores.



2.2.4 Clima marítimo de los eventos de rebase

El objetivo principal de este apartado es caracterizar los sucesos de inundación identificados en el capítulo 1. Para ello, en la tabla a continuación se sintetizan para cada uno de los eventos de inundación los parámetros relacionados con los fenómenos mareales. En la tabla se resumen las elevaciones correspondientes a las dos pleamares que tienen lugar durante un día. Se identifica también cual es el valor de la bajamar máxima, para estimar con todo ello el valor de la carrera máxima en el día de la inundación.

Fecha (dd/mm/aaaa)	Hora Pleamar 1 (HH:MM)	N.M. Pleamar 1 (m)	Hora Pleamar 2 (HH:MM)	N.M. Pleamar 2 (m)	Hora Bajamar max (HH:MM)	N.M. Bajamar (m)	Carrera max (m)
06/01/2002	07:00	0.8187	19:30	0.5868	13:00	-0.5996	1.4183
02/07/2007	02:00	0.6841	14:00	0.9044	20:30	-0.8296	1.7340
23/12/2010	02:00	1.0882	14:30	0.8553	08:30	-0.9246	2.0128
14/05/2011	10:30	0.8724	22:30	1.0035	03:00	-0.7872	1.7907
29/08/2011	01:00	0.9997	13:00	1.2197	20:00	-1.1385	2.3582
18/06/2012	00:00	0.6153	13:00	0.7792	19:00	-0.7685	1.5477
27/08/2014	02:00	0.8631	14:00	0.9700	08:00	-0.8980	1.8680

Tabla 4: Componentes mareales del nivel del mar durante el evento de inundación

A continuación, se realiza un análisis para cada uno de los eventos de rebase recogidos en la Tabla 4. La caracterización incluye rosas de oleaje y gráficas donde se muestra la evolución del nivel del mar, altura de ola significativa, periodos de pico y dirección del oleaje durante el día en el que el evento tiene lugar.

Se ha excluido el evento de inundación del día 20 de octubre de 2015 recogido en el capítulo 1, debido a que los datos de tal fecha no están recogidos en la serie de datos empleada. Además, para el evento del 27 de agosto del 2014, no existen mediciones del nivel del mar causado por la marea meteorológica. Por tanto, se asumen igual a cero, y se realiza el análisis únicamente con los valores disponibles de marea astronómica. Puede entenderse que no es del todo correcto, pero los valores obtenidos siguen siendo significativos, pues es la marea astronómica el fenómeno dominante.

6 de enero de 2002

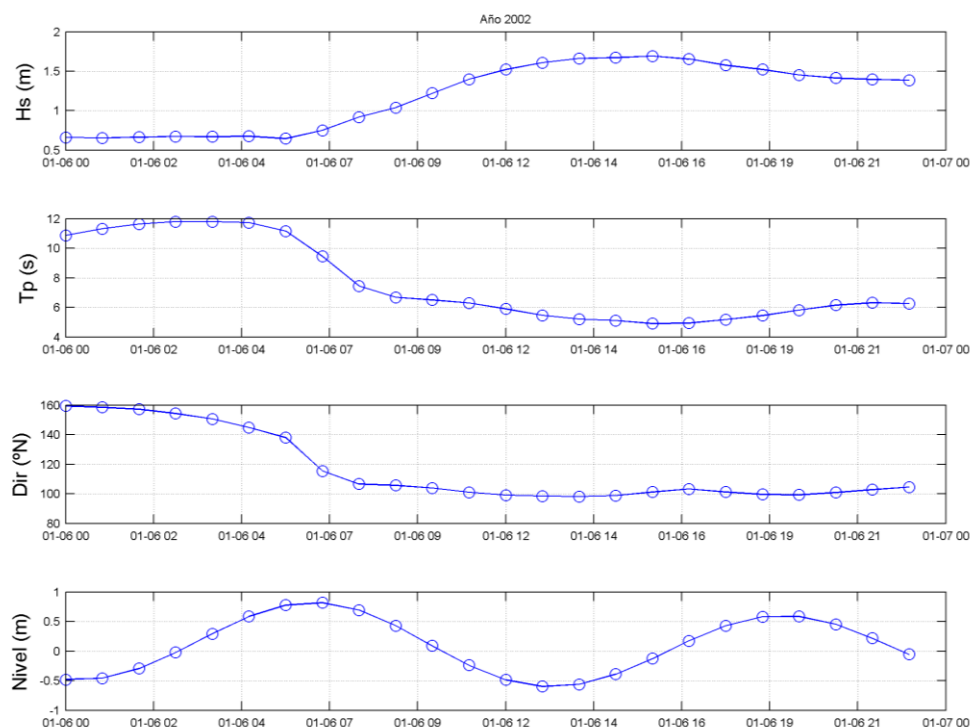


Figura 29: Características del oleaje 06/01/2002

El evento del 6 de enero de 2002 se caracteriza principalmente por la importancia de los componentes direccionales Este y Este Sureste. De acuerdo con la información periodística recabada en el capítulo 1, el evento de inundación tuvo lugar en las horas cercanas al amanecer, y por tanto se estima que el periodo pico es de entorno a los 8 s. El oleaje cuenta a lo largo del evento con una altura significativa de 0.7 m. Cabe mencionar que la inundación tuvo lugar en las horas en las que la marea estaba subiendo, pudiendo ser más dañino entorno a las 7 am. hora de pleamar. Este evento con oleaje de periodos menores a los característicos de la estación de invierno.

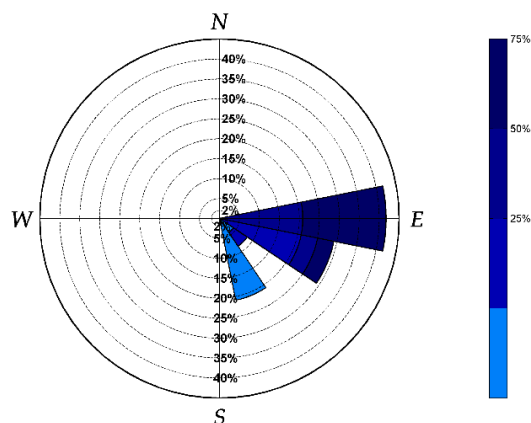


Figura 30: Rosa de oleaje 06/01/2002



2 de julio de 2007

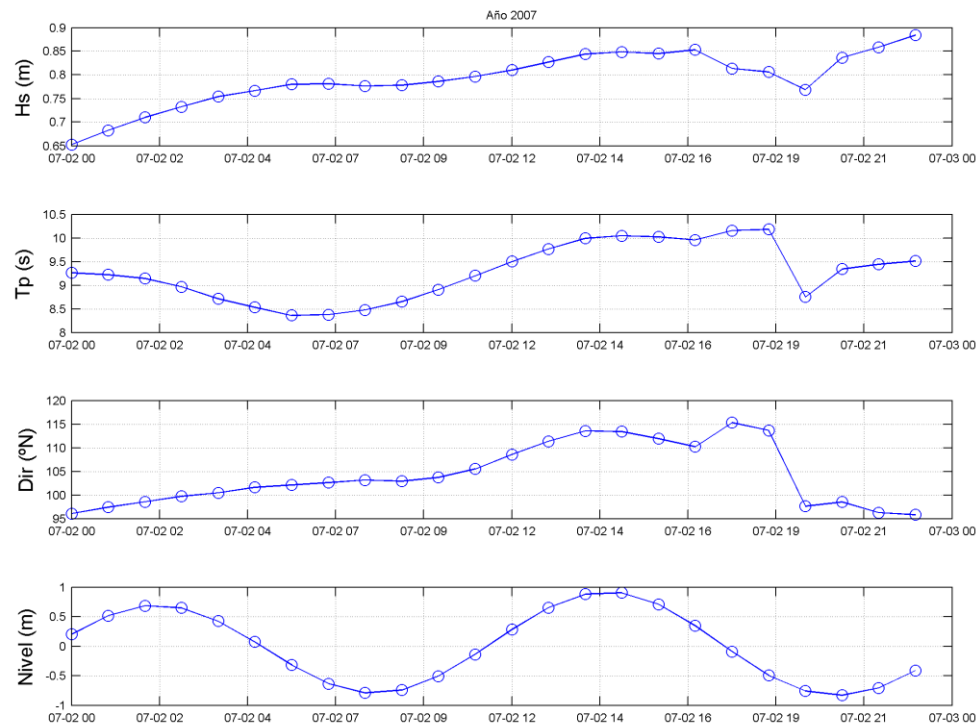


Figura 31: Características del oleaje 02/07/2007

El evento del 2 de julio de 2007 se caracteriza principalmente por la importancia de los componentes direccionales Este y Este Sureste. Se estima que el periodo pico del evento oscila en torno a los 8.5-10 s. Este periodo puede ser considerado un periodo bajo. El oleaje cuenta a lo largo del evento con una altura significativa media de 0.8 m. En lo que a la relación entre las características del evento y la estación se refiere, observamos que no existe componente de ángulo mayor a ESE, característico del verano. Además, el periodo es relativamente bajo.

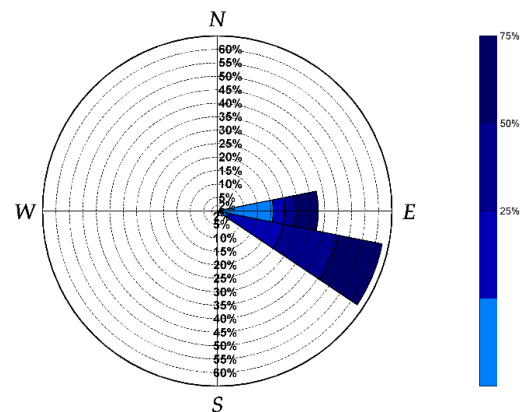


Figura 32: Rosa de oleaje 02/07/2007

23 de diciembre de 2010

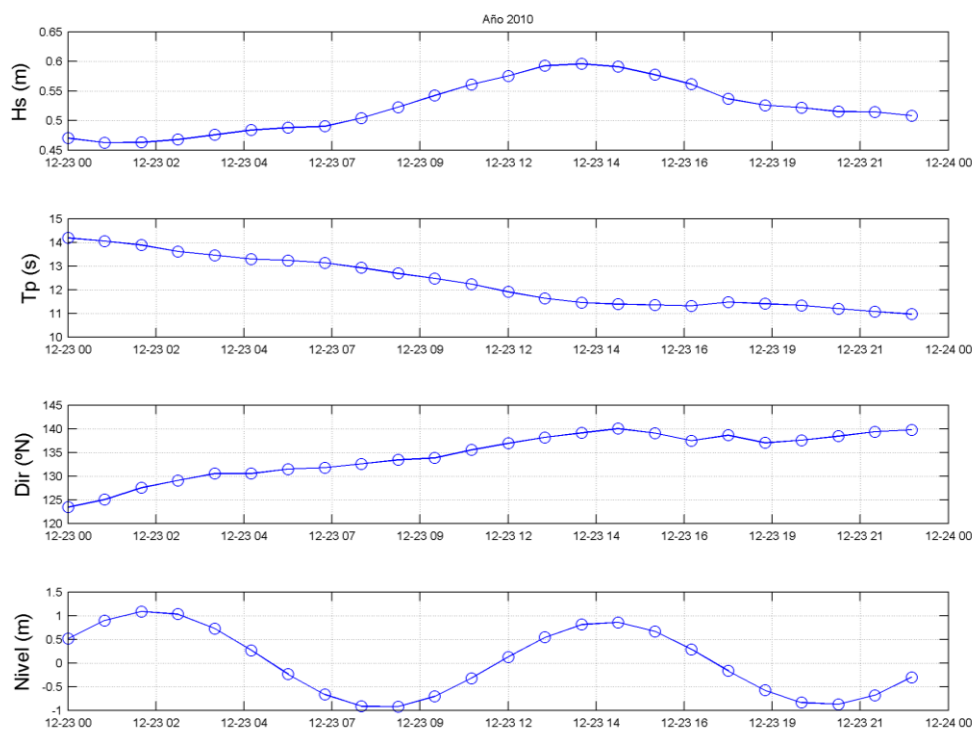


Figura 33: Características del oleaje 23/12/2010

El evento del 23 de diciembre de 2010 se caracteriza principalmente por la importancia de la componente direccional Sureste. Se estima que el periodo pico del evento oscila en torno a los 12-14 s. Se observa que este periodo es mayor a los que previamente se han comentado. El oleaje cuenta a lo largo del evento con una altura significativa media de 0.5 m. Como se ha mencionado anteriormente, los periodos largos son característicos de las estaciones de invierno y otoño, por tanto, el oleaje cumple las particularidades de la estación previamente definidas.

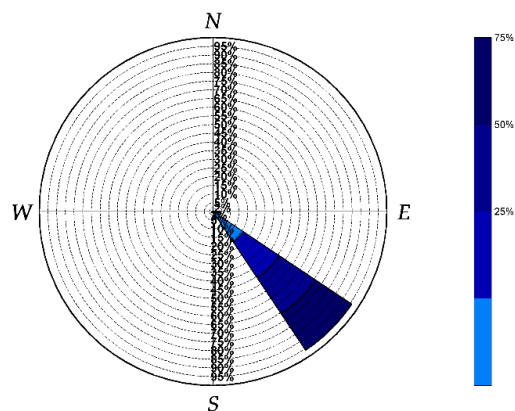


Figura 34: Rosa de oleaje 23/12/2010



14 de mayo de 2011

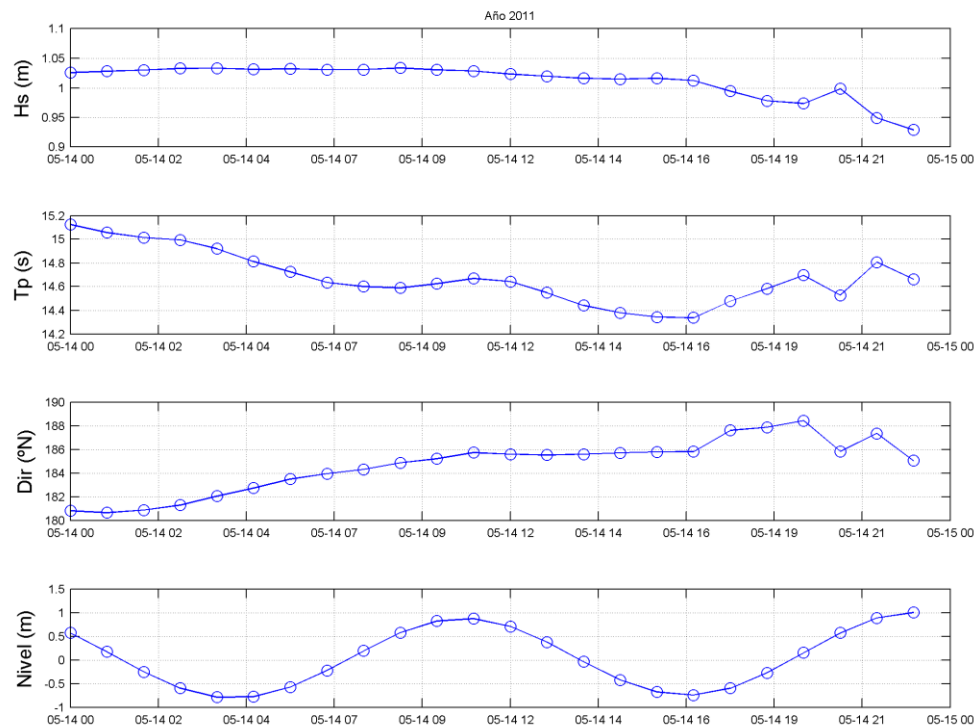


Figura 35: Características del oleaje 14/05/2011

El evento del 14 de mayo de 2011 se caracteriza principalmente por la importancia de la componente direccional puramente Sur. Se estima que el periodo pico del evento oscila en torno a los 14 s. El oleaje posee una altura significativa media mayor al metro. Por tanto, se estima que es de gran relevancia en este evento. Cabe mencionar que la componente puramente Sur no es la dirección predominante en a lo largo de la primavera, pero si es la dirección que cuenta con una altura de ola elevada. Esta característica explica que en este evento se registren olas de mayor altitud al resto de eventos que se recogen.

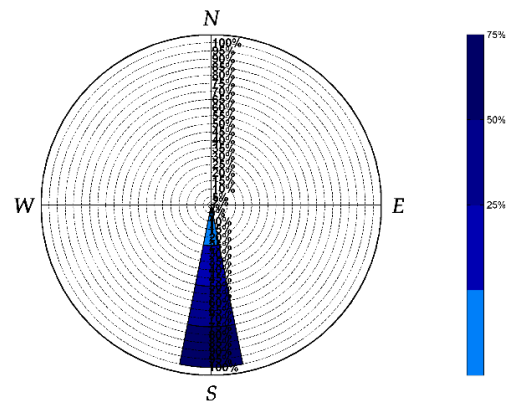


Figura 36: Rosa de oleaje 14/05/2011

29 de agosto de 2011

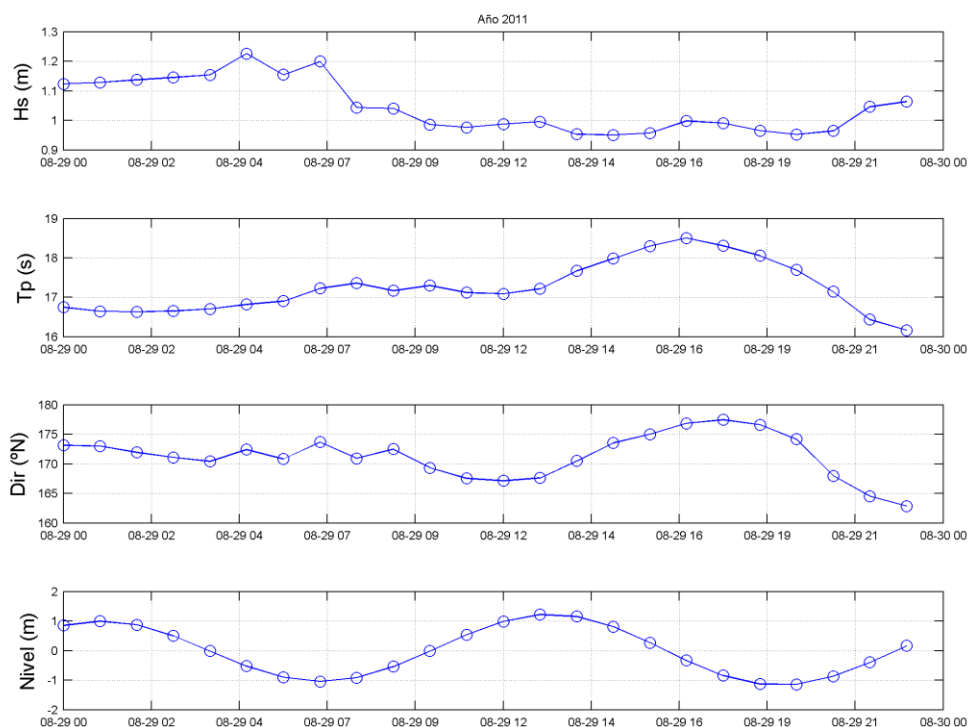


Figura 37: Características del oleaje 29/08/2011

El evento del 29 de agosto de 2011 como se ha venido mencionando, se conoce como uno de los eventos más relevantes en la historia de inundaciones de San Andrés. Este evento se caracteriza principalmente por la importancia de la componente direccional puramente Sur, la cual es anormal para la época del año en la que el evento tiene lugar. Se estima que el periodo pico del evento oscila en torno a los 17-18 s. El oleaje posee una altura significativa media mayor al metro. Por tanto, se estima que es de gran relevancia en este evento. Como se ha expuesto, la componente Sur no es usual en esta época y puede explicar la gran altura de ola registrada. Debido a que como se ha visto anteriormente, la componente Sur se relaciona con altos valores de altura significativa.

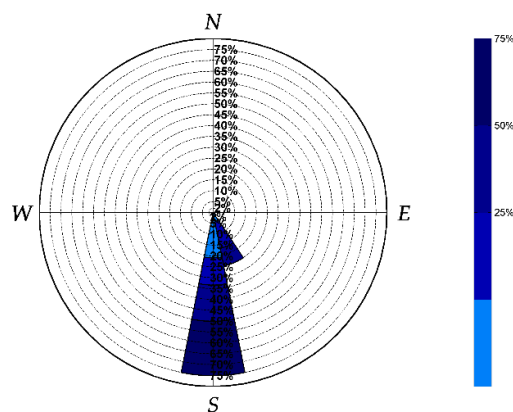


Figura 38: Rosa de oleaje 29/08/2011



18 de junio de 2012

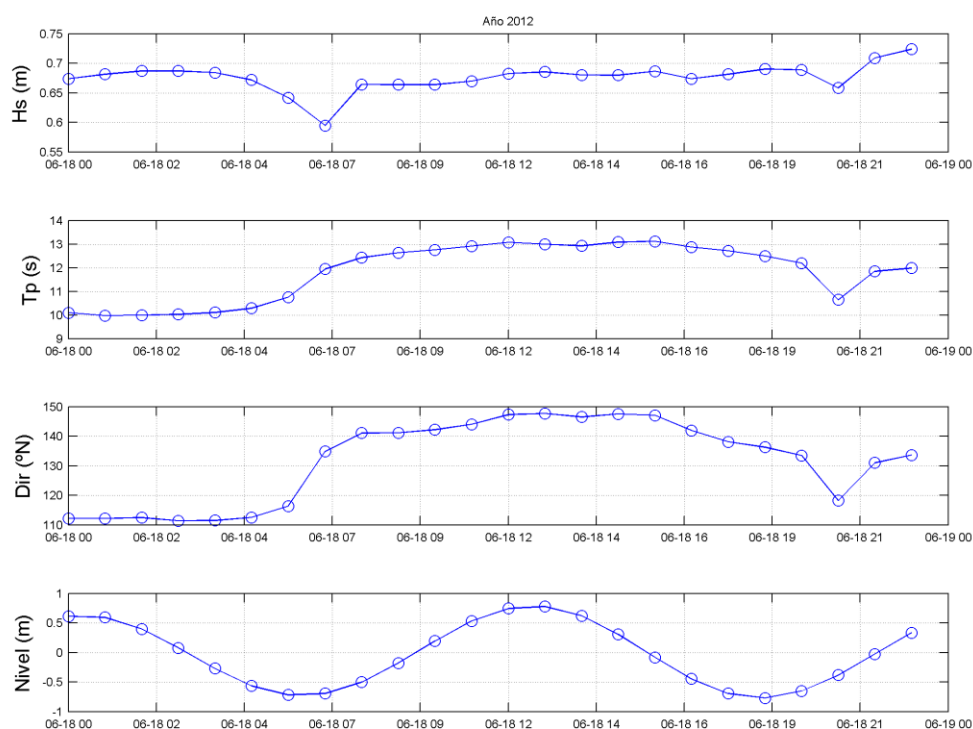


Figura 39: Características del oleaje 18/06/2012

El evento del 18 de junio de 2012 se caracteriza especialmente por la importancia de la componente direccional Sureste. El periodo pico del evento se coloca entorno a los 12-13 s, por lo tanto, es mayor al periodo pico medio de la estación del año. El oleaje posee una altura significativa media de 0.7 m.

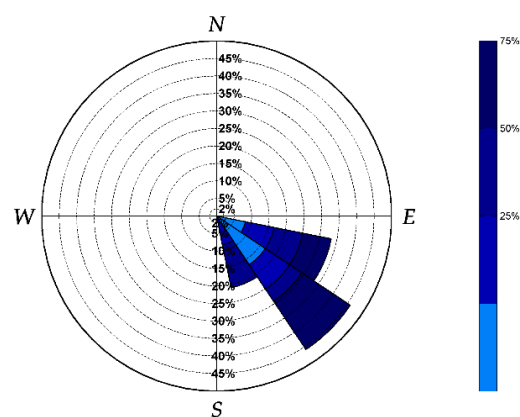


Figura 40: Rosa de oleaje 18/06/2012

27 de agosto de 2014

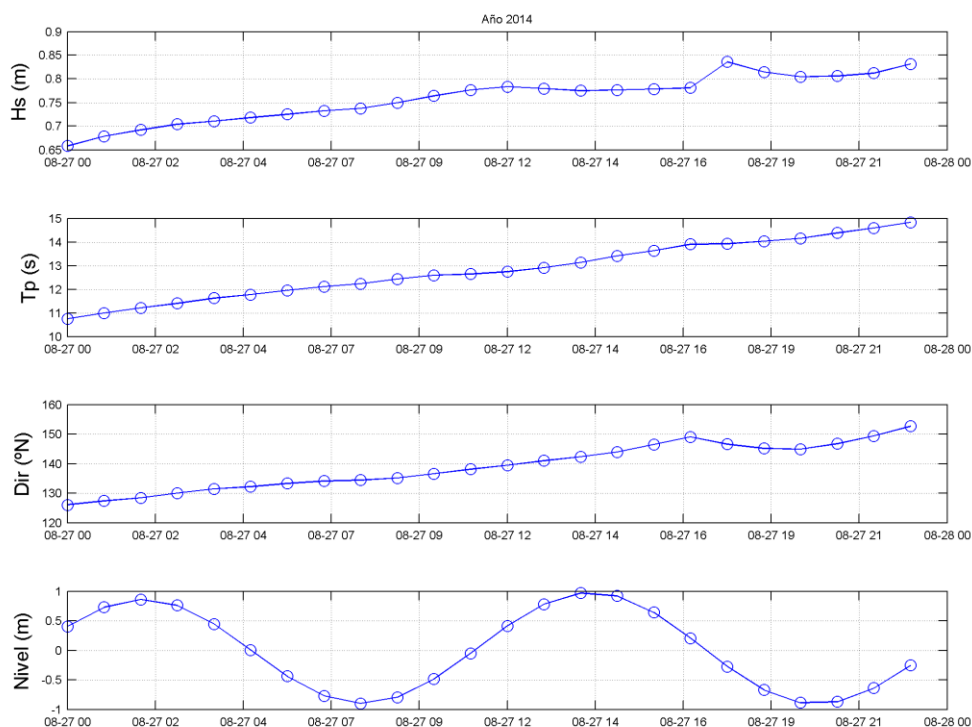


Figura 41: Características del oleaje 27/08/2014

El evento del 27 de agosto de 2014 se caracteriza principalmente, al igual que en eventos anteriores, por la importancia de la componente direccional Sureste. El periodo pico del evento se coloca entorno a los 13 s de media, por lo tanto, es mayor al periodo pico medio de la estación del año. El oleaje posee una altura significativa media de 0.75 m.

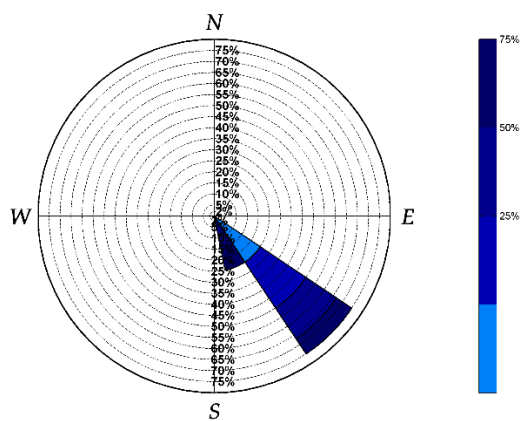


Figura 42: Rosa de oleaje 27/08/2014



2.3 Discusión

Se recoge en la tabla a continuación un resumen de las principales características numéricas de los eventos de inundación. Estas características son la altura significativa de ola (H_s), tiempo de pico (T_p), dirección principal del oleaje (θ) y carrera máxima.

Fecha (dd/mm/aaaa)	Carrera max (m)	H_s (m)	T_p (s)	θ (°N)
06/01/2002	1.4183	0.6-1.0	7-10	100-140
02/07/2007	1.7340	0.65-0.90	8.5-10.5	90-115
<u>23/12/2010</u>	<u>2.0128</u>	<u>0.45-0.6</u>	<u>11-14</u>	<u>125-140</u>
14/05/2011	1.7907	0.95-1.05	14-15	180-188
29/08/2011	2.3582	0.95-1.2	16-19	160-180
<u>18/06/2012</u>	<u>1.5477</u>	<u>0.6-0.70</u>	<u>10-13</u>	<u>115-145</u>
<u>27/08/2014</u>	<u>1.8680</u>	<u>0.65-0.85</u>	<u>11-15</u>	<u>125-150</u>

Tabla 5: Resumen de las características del oleaje de los eventos de inundación

Puede observarse que los eventos de inundación no se describen por unas características de oleaje concretas. Es decir, no existen unas únicas condiciones que sean las responsables de las inundaciones en San Andrés.

Sin embargo, y atendiendo principalmente a la dirección del oleaje, pueden distinguirse tres comportamientos diferentes.

Por una parte, el grupo de oleaje 1, indicado en la tabla mediante tipología de letra *cursiva*, tiene una dirección del oleaje entre 90° y 140°, es decir, una dirección E, ESE o SE. Por otro lado, el grupo de oleaje 2, indicado en la tabla con tipología de letra **negrita**, tiene una dirección de oleaje entre 150° y 190°. Dicho de otra forma, será oleaje con dirección SSE o S. Finalmente el grupo de oleaje 3, indicado en la tabla con subrayado, se caracteriza por tener unas componentes principalmente SE o SSE, es decir direcciones entre 120° y 150°.

2.4 Conclusiones del análisis del clima marítimo

A modo de conclusiones generales de este segundo capítulo, podemos concluir lo siguiente:

- Como ha sido demostrado en la Tabla 3, todas las inundaciones ocurridas en San Andrés coinciden con mareas vivas u ocurren en fechas cercanas a los perigeos. Por tanto, queda clara la relación entre las componentes mareales del nivel del mar y los eventos de inundación. Asimismo, las carreras provocadas principalmente por las mareas astronómicas tienen un valor de entre 1.5 m a 2 m. Sin embargo, estos valores se exceden de manera considerable en el evento ocurrido en agosto de 2011, llegando a ser el valor de la carrera registrada de 2.36 m. Es esta por tanto una de las razones por las que el evento de finales de agosto de 2011 fue de gran magnitud y causó severos daños.
- En cuanto a la distribución temporal de los eventos de inundación, varios de los eventos no cumplen de manera concreta las características asociadas al oleaje de su estación. Además, cabe destacar, que no se cuenta con un número de inundaciones tan elevado como para ser capaces de extrapolar una relación entre la época del año y los eventos con suficiente precisión. Por tanto, no pueden distribuirse temporalmente los grupos de oleaje identificados
- Por otro lado, el oleaje con menor ángulo de incidencia, grupo de oleaje 1, se caracteriza por tener un periodo de pico menor al de los grupos de oleaje 2 y 3. Asimismo, el grupo 3 se identifica como el grupo con mayores periodos de pico.
- Los grupos de oleaje descritos anteriormente (Grupo 1, Grupo 2 y Grupo 3) tienen una altura de ola significativa similar. Siendo el valor de esta de en torno a 0.5 – 1.2 m. Aun no siendo la diferencia muy notable, puede distinguirse la tendencia del grupo de oleaje 3, a tener una altura significativa de ola mayor.
- Si se realiza la comparación de los grupos de oleaje, puede decirse que el oleaje de los grupos 2 y 3, con periodos mayores, tiene un rango de dirección de incidencia menor, es decir, la dirección puede considerarse más específica y constante. Esto da lugar a pensar que estos oleajes, tiene carácter de *swell* (oleaje de fondo). A su vez, el oleaje del grupo 1, aparece menos ordenado y con periodos de pico menores, lo que implica que se ha formado en un lugar más próximo a San Andrés, no teniendo tanto espacio disponible (*fetch*) para su total desarrollo. Puede entenderse además por la dirección del oleaje, que este se ha formado al Este de la isla. Esta zona se encuentra geográficamente limitada, y por tanto el oleaje no dispone de tanto espacio para su desarrollo.

3. EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LOS EVENTOS DE REBASE E INUNDACIÓN

3.1 Creación y descripción del modelo dinámico

El principal objetivo de este tercer capítulo es el de modelar y evaluar numéricamente los eventos de inundación descritos y caracterizados anteriormente. Para ello, es necesario por una parte establecer qué modelo numérico va a emplearse, y por otro, crear y montar el modelo por se. Una vez realizadas dichas tareas, se procede a ejecutar el modelo con las condiciones que han sido registradas en los diferentes eventos de inundación, es decir, se reproducen dichos eventos. Con los resultados obtenidos, se realiza un primer diseño de las protecciones costeras.

3.1.1 Introducción

La base de datos utilizada para obtener las características de cada uno de los eventos se localiza en un punto de la zona costera frente al pueblo de San Andrés. Sin embargo, estos datos han de ser propagados desde aguas profundas hasta el frente de la avenida donde tienen lugar los rebases. Es decir, debe de propagarse el oleaje para obtener sus características en aguas someras.

En la propagación, el oleaje se somete a los procesos de transformación comentados en el capítulo 2. Esto implica que el oleaje es transformado por procesos de difracción, asomeramiento, refracción y reflexión. Estos procesos dependen de la batimetría del fondo marino, así como de las condiciones del viento y las características del contorno. Por tanto, el modelo utilizado para realizar la propagación debe de implementar las modificaciones debidas a estos procesos.

Es importante comprender que el modelado de sistemas puede realizarse mediante modelos que se clasifican principalmente por ser físicos o numéricos.

Los modelos físicos se refieren a la representación física de un fenómeno natural. Esta representación suele realizarse generalmente a menor escala, por ejemplo, en pruebas de laboratorio. Dado que estos modelos son la reproducción natural de los procesos físicos, no incluyen ninguna parametrización o hipótesis, lo cual se considera una de sus principales ventajas. Asimismo, los modelos físicos pueden utilizarse para reproducir procesos que hasta ahora no se comprenden completamente y, por lo tanto, no se pueden describir matemáticamente de manera suficiente. La principal desventaja de estos modelos es que su configuración es un procedimiento complejo. Además, su limitación más relevante es que la fiabilidad se ve afectada por efectos de escala, lo que supone que no pueden satisfacerse las condiciones impuestas por diferentes números adimensionales (Reynolds, Webber, Cauchy o Froude) al mismo tiempo. Otra limitación muy importante de los modelos físicos es la extracción de datos, pues la mayoría de las veces la instrumentación proporciona mediciones puntuales y puede llegar además a causar interferencias con el modelo. Finalmente, el alto coste que supone la reproducción de fenómenos mediante modelos físicos sea quizás la razón que ha desencadenado la evolución de los modelos numéricos.

A su vez, los modelos numéricos tienen como objetivo reproducir matemáticamente los procesos físicos que describen el fenómeno natural. En el caso de estudio, el objetivo de los modelos numéricos es el de reproducir matemáticamente los procesos de transformación que sufre el oleaje en su propagación. La mayor ventaja del modelado numérico es su bajo costo en comparación con las pruebas de modelos físicos. Además, ofrecen la posibilidad de implementar diferentes configuraciones con relativa rapidez y sin costo adicional. El modelado numérico



puede también mitigar dos de las mayores debilidades del modelo físico, que son: la extracción de datos y los efectos de escala. Debe recordarse que algunos modelos numéricos se basan en la parametrización de los modelos físicos. Estas parametrizaciones tienen habitualmente un rango de aplicabilidad limitado y por tanto deben de valorarse para no obtener resultados que sean poco realistas. Al mismo tiempo, la precisión de un modelo numérico depende de la resolución de la cuadrícula o malla empleada. Por lo general, cuanto más fina sea la malla, cuanto mayor sea su resolución, más preciso es el resultado obtenido. Pero, aumentar la resolución de la cuadrícula conlleva un costo computacional significativo.

Tradicionalmente, los modelos empleados para llevar a cabo variedad de estudios han sido los modelos físicos, pues no se disponía de herramientas computacionales suficientemente potentes para poder considerar la gran complejidad de los fenómenos a modelar. No obstante, hoy en día los modelos numéricos son utilizados con más frecuencia, debido principalmente a la creciente potencia de procesamiento y su bajo costo. Los modelos numéricos son capaces de describir procesos turbulentos complejos y pueden ser muy versátiles gracias a la amplia variedad de condiciones de contorno que se pueden aplicar. Cabe mencionar que, a la hora de realizar un estudio costero, además de modelos físicos de laboratorio a escala y el uso de modelos numéricos, ha surgido una tercera técnica de modelado. Esta técnica se conoce como modelado compuesto y se refiere al uso combinado de modelos físicos y numéricos. Esta técnica intenta mitigar las debilidades y aprovechar las ventajas de los dos métodos clásicos de modelado.

3.1.2 Metodología

Por lo mencionado anteriormente, y considerando las ventajas y desventajas tanto de modelos numéricos como físicos, se considera que, para el presente caso, es más conveniente utilizar un modelo numérico para reproducir la propagación del oleaje hacia la costa de San Andrés.

La metodología a seguir con los modelos numéricos se divide en tres fases principales, siendo estas: el preproceso, la resolución y el postproceso. Se enumeran a continuación los objetivos principales de cada una de las etapas, pues serán utilizadas a continuación para realizar el estudio.

- En el preproceso deben de definirse las hipótesis y simplificaciones que considera el modelo. Además, en esta etapa se define la geometría del dominio computacional. Es decir, se define la malla computacional que va a emplearse para resolver el modelo. Dado que la precisión y la eficiencia computacional dependen de la resolución de la malla, esta debe de definirse atendiendo a la potencia informática disponible y el alcance del estudio. En general, el equilibrio de ambos factores se establece mediante el uso de mallas no uniformes. Estas cuadrículas son más densas en las regiones de interés o donde tienen lugar grandes variaciones de las propiedades del fluido. Asimismo, en esta etapa se definen las características del fluido y las condiciones de contorno.
- En la etapa de resolución del modelo deben de resolverse las ecuaciones de Navier-Stokes. No obstante, debido al alto coste computacional que supone resolver estas ecuaciones, se han incorporado formas simplificadas de las mismas considerando varios supuestos. Dos de las simplificaciones más comunes se refieren a la eliminación de los términos de viscosidad, lo que resulta en las ecuaciones de Euler, y la eliminación de los términos de vorticidad.

- En el postproceso se ilustran los resultados obtenidos mediante una visualización en forma gráfica que ayude a que estos sean comprendidos con facilidad.

3.1.3 Modelo numérico seleccionado

Existe una gran cantidad de modelos numéricos disponibles para realizar la propagación del oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras. En este caso, considerando los procesos de transformación que sufre el oleaje a lo largo de su propagación, el modelo a utilizar es el MSP.

Como se ha venido mencionando, conforme el oleaje se aproxima a la costa, este sufre una transformación energética debida principalmente a la influencia de los contornos batimétricos. Como consecuencia, el oleaje experimenta procesos de difracción, refracción, asomeramiento y disipación de energía debida a la fricción con el fondo. Además, debido a la interacción con estructuras de protección costera, aparecen procesos de reflexión, interacción oleaje-estructura y en ocasiones, disipación del oleaje por efecto de rotura del mismo.

El modelo seleccionado, el modelo MSP, se basa en la aproximación de las ecuaciones elípticas de pendiente suave (*elliptic mild slope equations*) propuestas en 1972 por Berkoff. Estos modelos pueden utilizarse para el estudio de la agitación portuaria considerando contornos batimétricos complejos y oleaje irregular. Son capaces de resolver en un dominio numérico bidimensional los procesos lineales de refracción, difracción, asomeramiento y reflexión (total o parcial). Además, hoy en día, incluyen efectos de no linealidad, disipación de energía en rotura por fricción de fondo e interacción oleaje-corriente. Debe de mencionarse que este modelo, no incluye los efectos del viento sobre el oleaje, lo cual no es un gran inconveniente en el caso de estudio, debido a que la mayor transformación del oleaje ocurre por la interacción de este con el fondo. Además, la estructura o dique planteado al final de este capítulo, no cambia las condiciones de viento en la zona de estudio.

El modelo MSP se considera un modelo altamente versátil, ya que es capaz de analizar de manera sencilla y computacionalmente eficiente los patrones de agitación del oleaje. Asimismo, el modelo ha sido validado a través de su empleo en numerosos proyectos y estudios a nivel nacional e internacional.

Como se ha mencionado, la característica general del modelo MSP es que es un modelo elíptico no transitorio, basado en las ecuaciones elípticas de pendiente suave. Este modelo es lineal, dispersivo y estacionario. Por tanto, puede aplicarse a estudios de agitación en dársenas portuarias. Además, el modelo permite realizar una caracterización rápida de los periodos naturales de oscilación de diferentes estructuras costeras. El modelaje puede ser utilizado para estudiar los patrones de agitación para oleajes espectrales y monocromáticos. Por ello, es una herramienta útil para realizar el prediseño de estructuras y llevar a cabo su análisis de sensibilidad frente a modificaciones de elementos forzadores y alturas de marea. Asimismo, el modelo requiere que todas las condiciones de contorno sean definidas. La ejecución del modelo se realiza en un tiempo de ejecución medio. Una de las principales desventajas de este modelo, es que no permite la interacción entre ondas largas y cortas.

Los datos de entrada requeridos para realizar la definición del modelo son los siguientes:

- Definición de la geometría en planta del litoral.
- Batimetría de detalle.
- Coeficientes de reflexión de los contornos.
- Malla en elementos finitos.
- Ondas monocromáticas (H , T , θ).



- Oleaje irregular definido con un espectro TMA y función de distribución direccional (H_s , T_p , θ , γ , σ).
- Barrido en un rango de frecuencias (ruido blanco).

Los datos de salida obtenidos tras la ejecución del modelo son los enumerados a continuación:

- Oleaje monocromático (H , T , θ), y velocidades horizontales U-V en cada punto de la malla.
- Oleaje irregular (espectro direccional) en cada punto de la malla (H_s , T_p , θ_m).
- Coeficiente de amplificación y periodos naturales de oscilación resonante.

3.1.4 Montaje del modelo

Para poder realizar las distintas simulaciones, primero ha de realizarse el montaje del modelo. Para ello, es necesario establecer las dimensiones y características propias de cada contorno, sobre una base batimétrica. Es decir, deben de establecerse las coordenadas del conjunto de puntos de la zona a estudiar. Con ese fin, se acoplan los datos batimétricos y los datos del relieve de la franja litoral. Como se ha indicado anteriormente, debe de fijarse la resolución de la malla de modelaje. Además, la zona de estudio modelada debe de ser suficientemente amplia para contener todos los procesos de propagación que afectan al oleaje causante de inundaciones en San Andrés. Sin embargo, no debe de olvidarse, que cuanto mayor sea la superficie y más precisa sea su definición, mayor será el esfuerzo computacional requerido. Por tanto, debe de alcanzarse un equilibrio atendiendo al objetivo y la precisión requerida del estudio.

Para realizar el montaje del modelo, se ha seguido la guía del Mini-curso de propagación y agitación del oleaje desarrollada para alumnos de la Universidad de Cantabria por el Profesor Gabriel Díaz Hernández.

La metodología seguida en esta guía para realizar el montaje del modelo, y por consiguiente en este TFG, sigue la técnica de *Downscaling*. Esta técnica se basa en trasladar una serie histórica (*hindcast*) de oleaje y nivel del mar (mareas astronómica y meteorológica) desde aguas indefinidas hasta aguas someras. Esta traslación, también conocida como propagación, es un proceso compuesto por varias etapas.

En el caso de estudio, la serie de datos proporcionada no se encuentra en aguas indefinidas, sino que se encuentra situada en la zona costera frente a San Andrés. Por tanto, el proceso de *downscaling* se reduce a realizar una única propagación para trasladar los datos hasta el frente de la avenida marítima.

Al realizar la propagación hasta aguas someras, la serie debe de ser sometida a procesos de transformación, como se ha venido sugiriendo a lo largo de este capítulo. Estos procesos darán lugar a la transformación del oleaje, también conocida como agitación del oleaje.

El primer paso para efectuar la propagación es realizar el análisis del clima marítimo en el punto de aguas profundas donde se localiza la serie. Este paso ha sido realizado a lo largo del capítulo 2, para el régimen general, régimen estacional y para cada uno de los eventos de rebase.

A efectos de este TFG se efectúa de manera separada e independiente la propagación del oleaje para cada uno de los eventos de inundación. Con ello, se obtiene la agitación específica del oleaje en dichos eventos y por tanto estos resultados serán posteriormente utilizados para el diseño de estructuras de protección costera. Puede considerarse que el oleaje de los eventos de

inundación es el más significativo a la hora de diseñar diques o infraestructuras similares que protejan al pueblo de San Andrés de los rebases.

Centrados en el modelaje del caso de estudio en cuestión, se realiza el estudio siguiendo el planteamiento de los 3 grupos de oleaje identificados al final del capítulo 2.

Los pasos a seguir para llevar a cabo la simulación son los siguientes. Primero, debe leerse la batimetría de la zona. Tras ello, debe de introducirse el contorno de la zona de estudio. En este punto, para realizar la propagación de los tres grupos de oleaje identificados, existen 3 contornos diferentes. Se utiliza cada uno de los contornos para analizar el oleaje con componente principalmente Este, componente Sureste y componente principalmente Sur. Para definir cada uno de los contornos con total detalle, deben de establecerse los coeficientes de reflexión para cada uno de los tramos del contorno, con el fin de que pueda obtenerse la respuesta numérica de agitación del oleaje. El valor de estos coeficientes depende de la tipología de la estructura. El coeficiente tiene un valor de 0 para contornos totalmente absorbentes o valor de 1 para contornos totalmente reflejantes. Los valores tradicionales de los coeficientes de reflexión según las estructuras que forman el contorno son:

- Valor de 0.1 para una playa.
- Valor de 0.3 para un dique en talud de materiales sueltos.
- Valor de 0.5 para un acantilado.
- Valor de 0.9 para un dique vertical.
- Valor de 0.0 para un contorno abierto (agua).

Para poder establecer los valores de reflexión en caso del contorno de estudio, se han analizado imágenes satelitales obtenidas desde Google Earth®. Mediante un análisis visual se ha determinado el tipo de contorno, y por consiguiente se ha establecido el valor del coeficiente.

Se muestran en las imágenes a continuación los contornos para cada uno de los grupos de oleaje (imagen de la derecha) los valores de reflexión adoptados para cada punto de los contornos (imagen de la izquierda). La imagen de los contornos muestra cómo el contorno de generación del oleaje (color rojo) es cuasi-perpendicular a la dirección del oleaje incidente. Esta colocación evita la entrada de oleajes oblicuos al dominio y por tanto previene resultados erróneos. Por este motivo, es importante contar con más de una malla, que defina más de una línea de entrada de oleaje, para una misma localización.

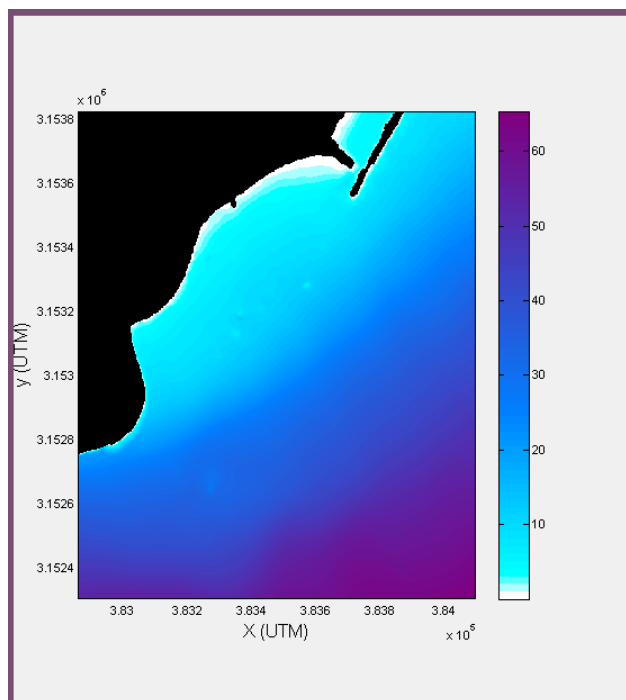


Figura 43: Batimetría de la zona de San Andrés insertada en el modelo MSP

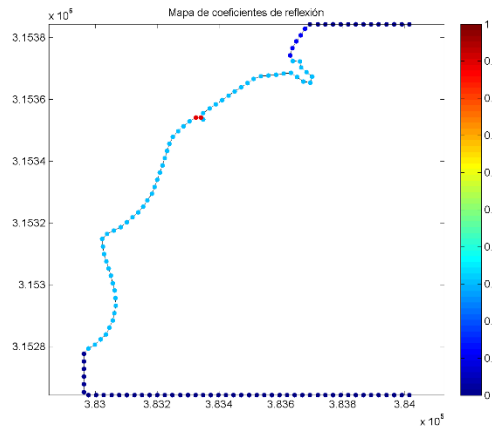


Figura 44: Coeficientes de reflexión del contorno para oleaje del Grupo 1 - Este

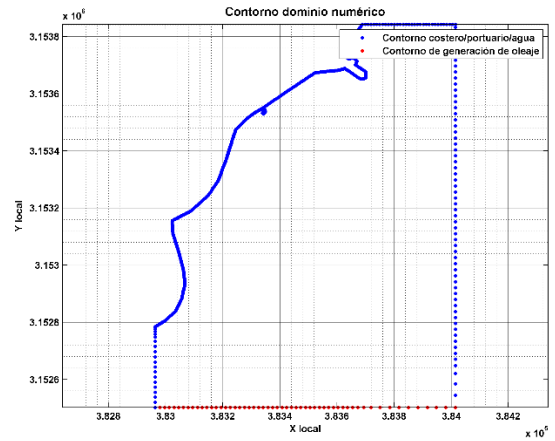


Figura 45: Contorno para el oleaje del Grupo 1 - Este

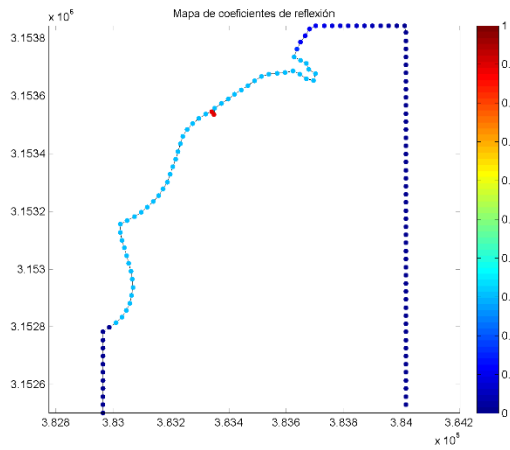


Figura 46: Coeficientes de reflexión del contorno para oleaje del Grupo 2 - Sur

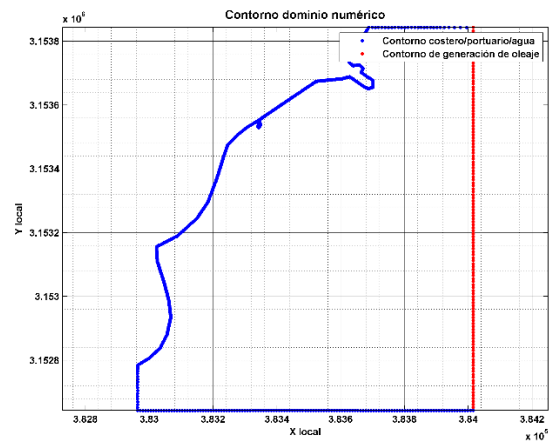


Figura 47: Contorno para el oleaje del Grupo 2 - Sur

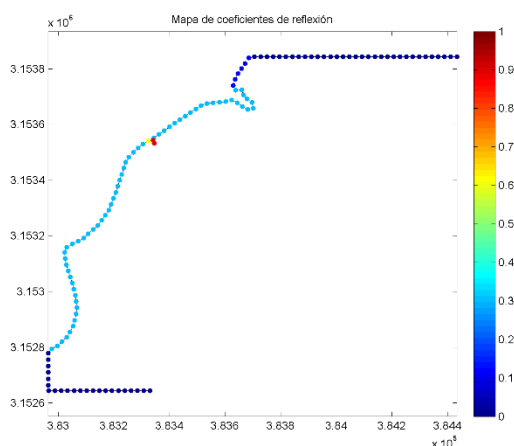


Figura 48: Coeficientes de reflexión del contorno para el oleaje del Grupo 3 - Sureste

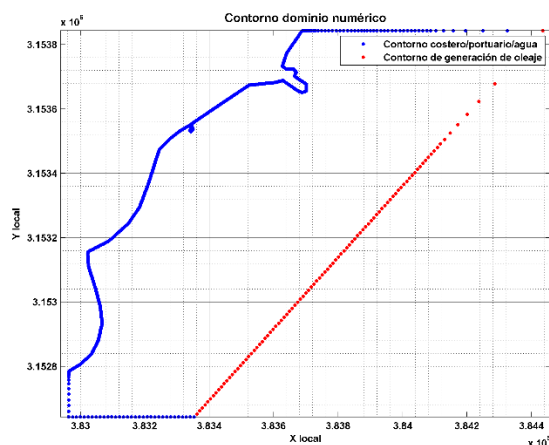


Figura 49: Contorno para el oleaje del Grupo 3 - Sureste

Una vez establecida la batimetría y el contorno, el siguiente paso es definir el mallado para la agitación. El modelo MSP está preparado para propagar el oleaje en una sola malla de elementos triangulares y adaptativos en función de la variación de longitud de onda sobre el contorno batimétrico. Es decir, el modelo concentra nodos en las zonas de profundidad más somera y relaja nodos en las zonas más profundas del dominio. En cuanto a la resolución del mallado, únicamente se tiene que tener en cuenta que el periodo T que representa la malla numérica. Dicho de otra forma, la malla numérica se diseña con base en un periodo representativo T , que garantiza contar con al menos 10 nodos que representan una longitud de onda L en todo el dominio. Por tanto, como recomendación general, se toma como punto de partida un periodo T de diseño de la malla igual al periodo mínimo registrado en la serie de datos seleccionados.

El valor de T seleccionado en cada uno de los casos es el valor mínimo del periodo para cada grupo recogido en la Tabla 6. Además, al realizar el mallado se establece que la cota batimétrica mínima a ser tomada en cuenta a la hora de interpolar la malla es 0.5 m. Este valor permite reducir el número de nodos en zonas someras.

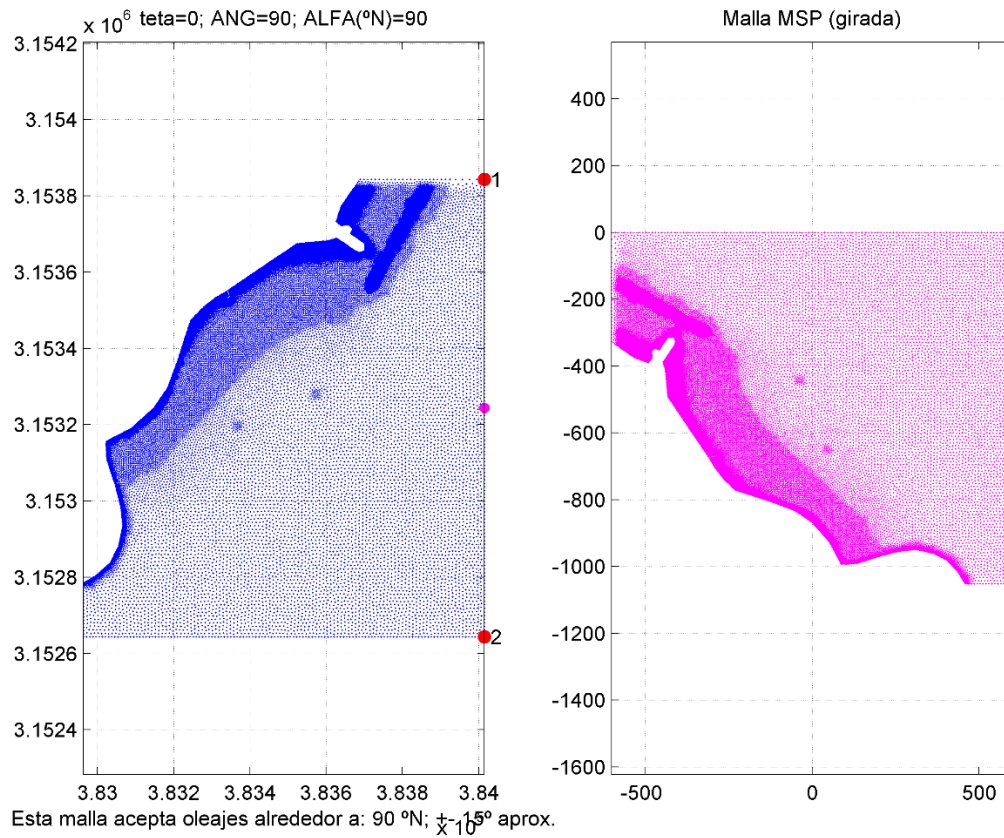


Figura 50: Malla MEF para el oleaje del Grupo 1 – Este

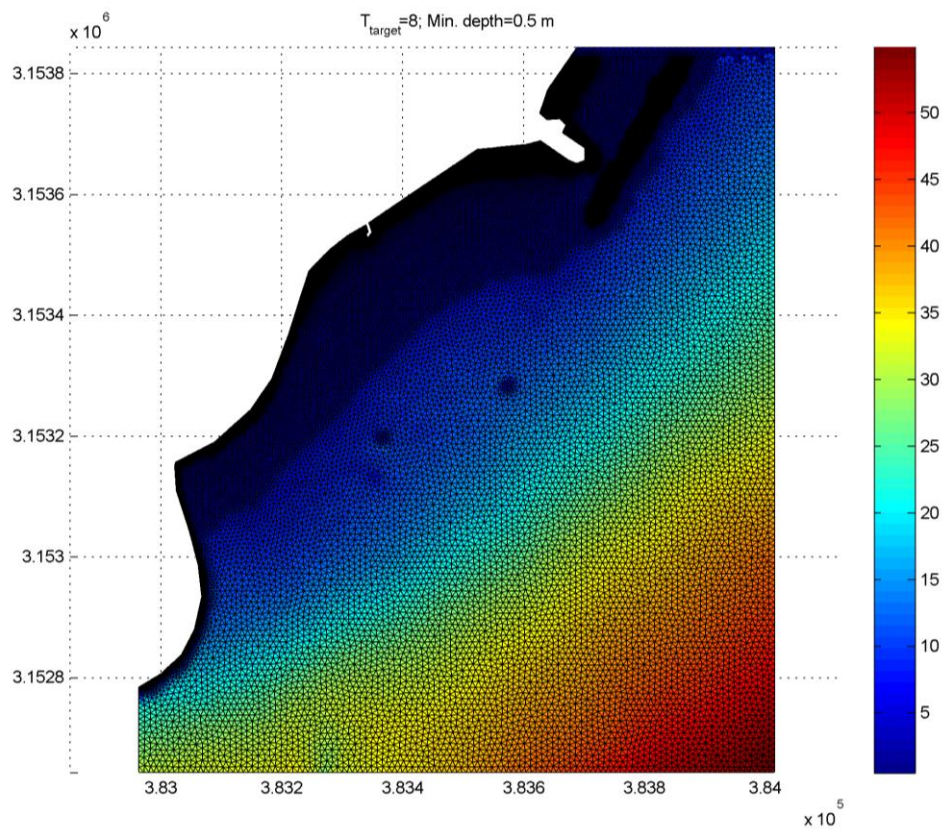


Figura 51: Malla MEF ajustada a la batimetría para el oleaje del Grupo 1 - Este

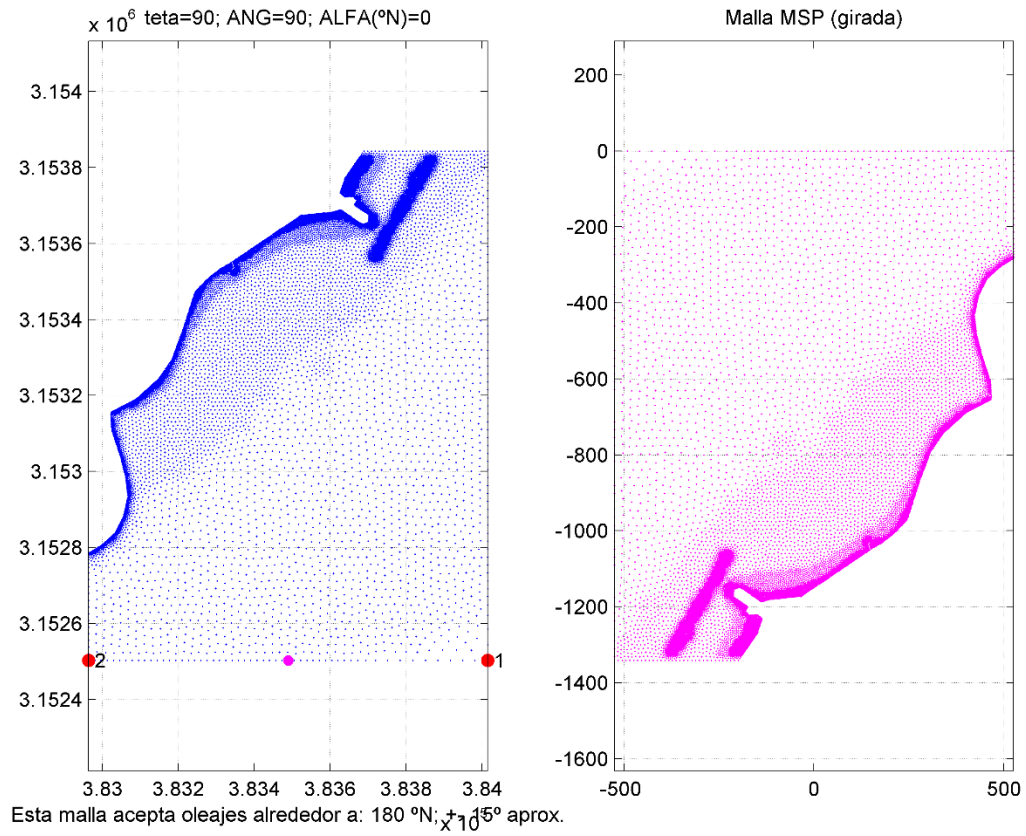


Figura 52: Malla MEF para el oleaje del Grupo 2 – Sur

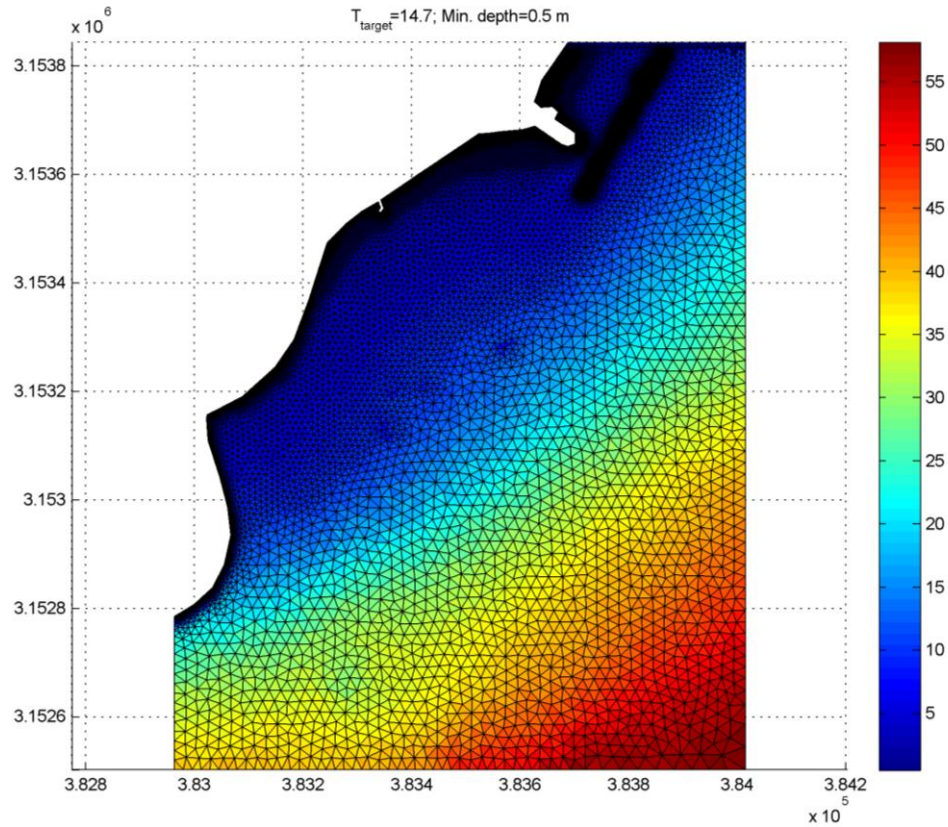


Figura 53: Malla MEF ajustada a la batimetría para el oleaje del Grupo 2 - Sur

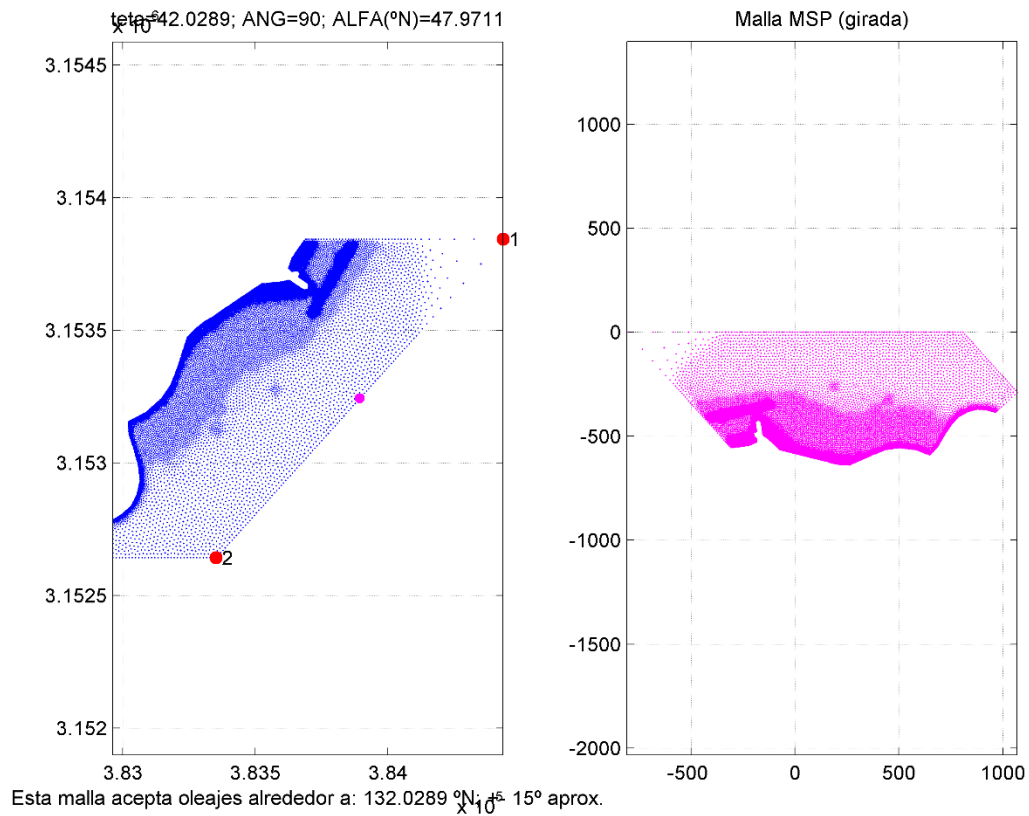


Figura 54: Malla MEF para el oleaje del Grupo 3 – Sureste

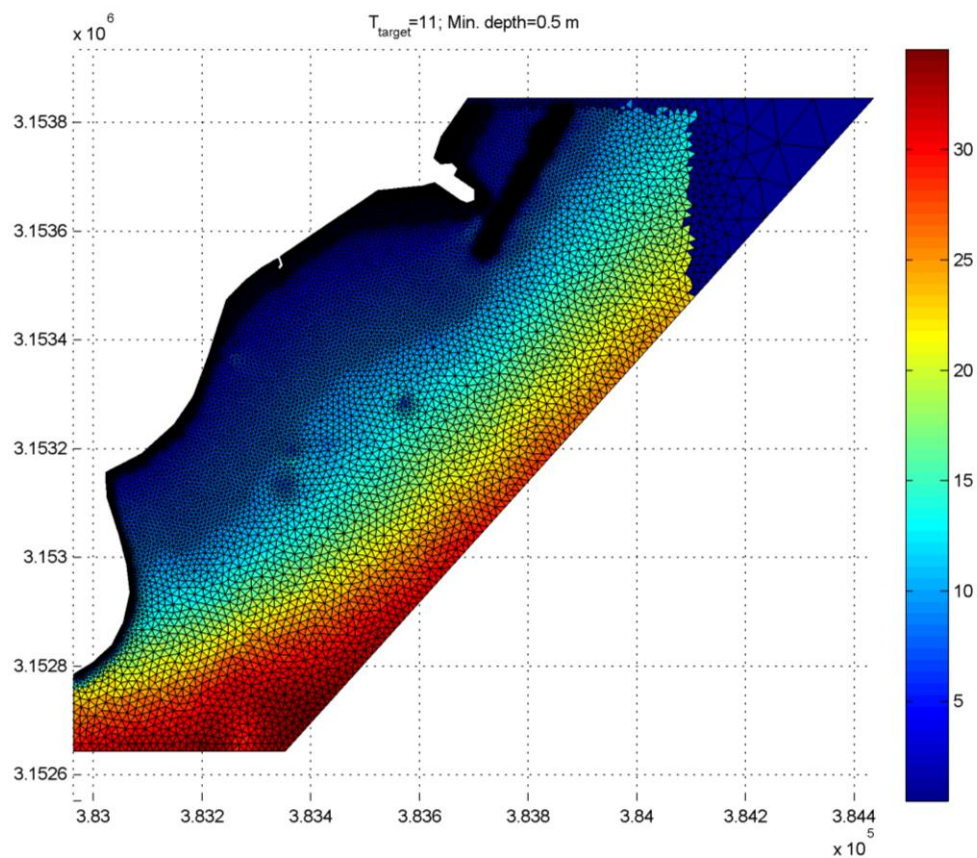


Figura 55: Malla MEF ajustada a la batimetría para el oleaje del Grupo 3 - Sureste

Una vez definida la malla, se procede a efectuar la propagación del oleaje desde aguas profundas a aguas someras. El oleaje a propagar para cada uno de los grupos mencionados anteriormente se recoge en la tabla siguiente. Estas características resumen mediante un único valor los eventos de inundación recogidos en la Tabla 5.

Grupo	AA	MM	DD	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Marea (m)
Grupo 1 – Este	2002	01	06	1.00	8	105	2.7
	2007	07	02	0.85	10	110	2.7
Grupo 2 – Sur	2011	05	14	1.03	14.7	186	2.7
	2011	08	29	1.00	17	170	2.7
Grupo 3 – Sureste	2010	12	23	0.55	12	135	2.7
	2012	06	18	0.65	13	150	2.7
	2014	8	27	0.8	13	143	2.7

Tabla 6: Características de los grupos de oleaje en aguas profundas para su propagación a aguas someras

El nivel del mar o marea se ha establecido en todos los casos igual a 2.7 m. Este valor, implica que el estudio se realiza en el momento de pleamar, lo que desde un punto de ingeniería de costas es más problemático a la hora de analizar inundaciones.

3.2 Reproducción numérica de los eventos de inundación

Se muestran a continuación los resultados de la propagación realizada para cada uno de los grupos característicos de oleaje. Los resultados se muestran mediante gráficas de elevación de la superficie del agua (lado izquierdo) y gráficas de la altura significativa de ola (lado derecho) para cada uno de los eventos contenidos en el grupo. La escala de ambos gráficos ha sido modificada (las unidades de elevación y altura de ola son metros) y unificada para todos los eventos de inundación, con el fin de facilitar la comparación de estos. Debido a las mayores alturas de ola que tienen lugar con oleajes de dirección Sur, son estos los que se han utilizado para calibrar la escala más adecuada de los gráficos.



3.2.1 Grupo 1 – Oleaje del Este

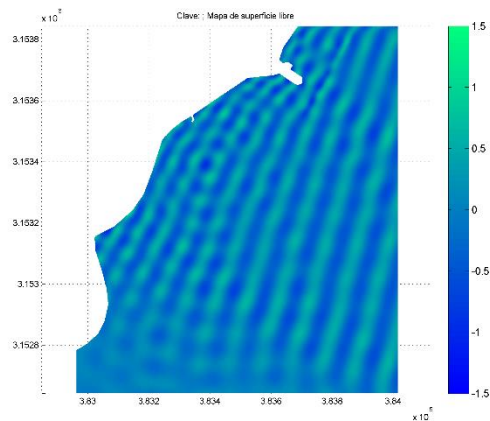


Figura 56: Elevación de la superficie del agua 06/01/2002

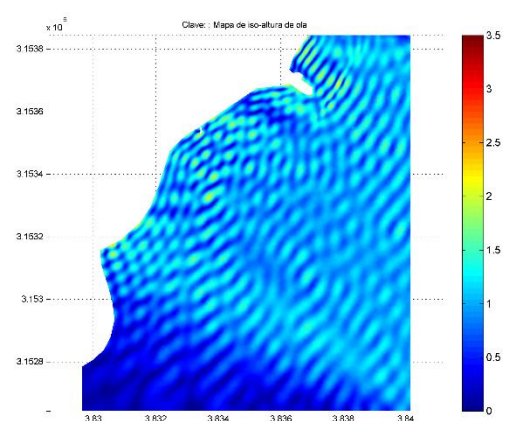


Figura 57: Altura significativa de ola 06/01/2002

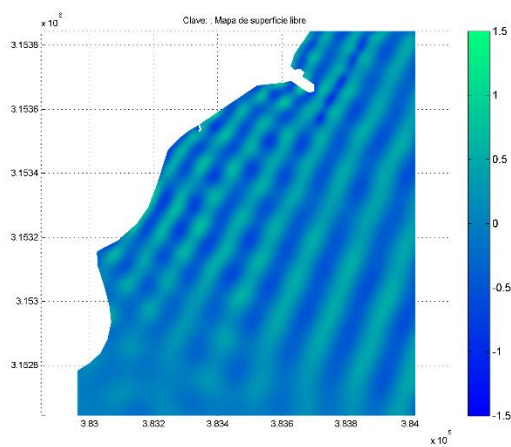


Figura 58: Elevación de la superficie del agua 02/07/2007

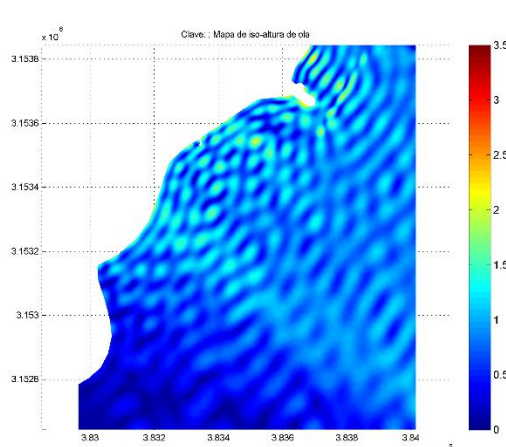


Figura 59: Altura significativa de ola 02/07/2007

3.2.2 Grupo 2 – Oleaje del Sur

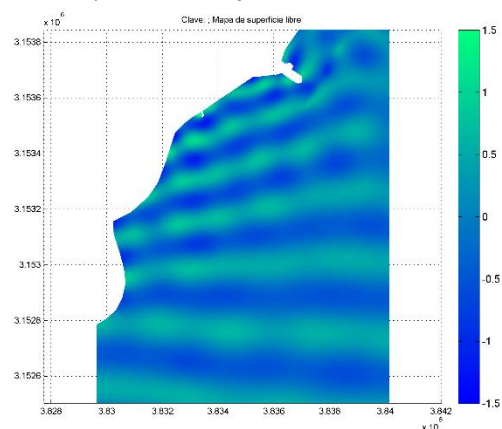


Figura 60: Elevación de la superficie del agua
14/05/2011

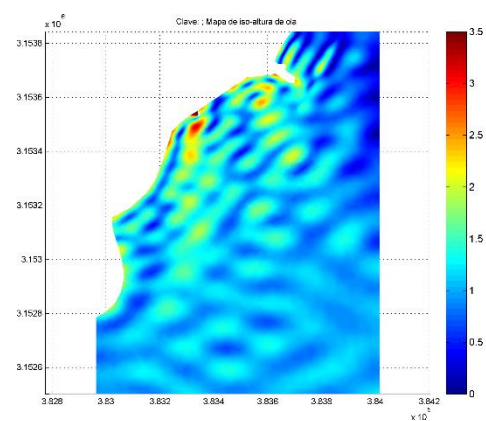


Figura 61: Altura significativa de ola 14/05/2011

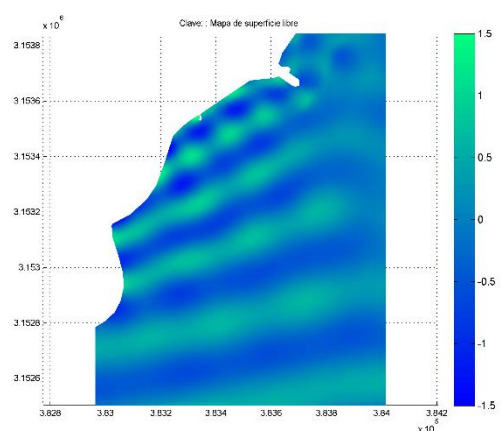


Figura 62: Elevación de la superficie del agua
29/08/2011

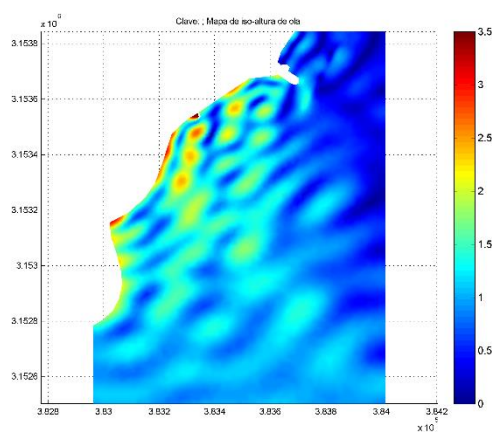


Figura 63: Altura significativa de ola 29/08/2011



3.2.3 Grupo 3 – Oleaje del Sureste

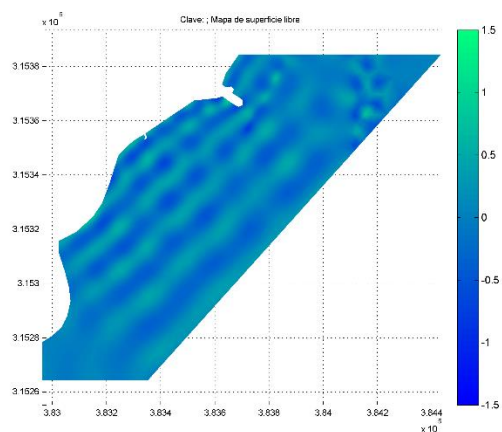


Figura 64: Elevación de la superficie del agua 23/12/2010

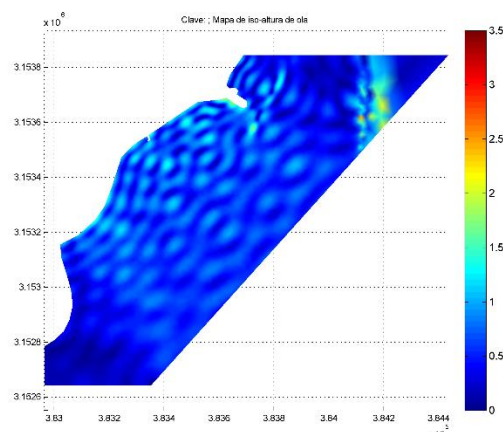


Figura 65: Altura significativa de ola 23/12/2010

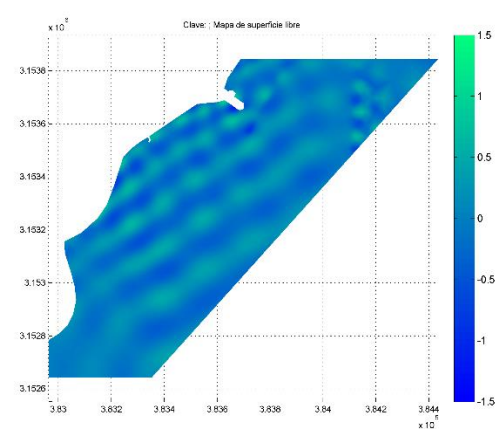


Figura 66: Elevación de la superficie del agua 18/06/2012

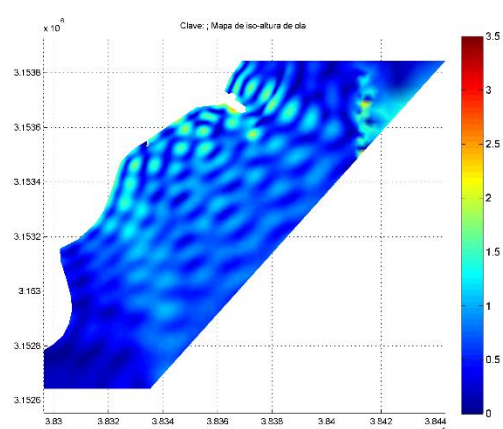


Figura 67: Altura significativa de ola 18/06/2012

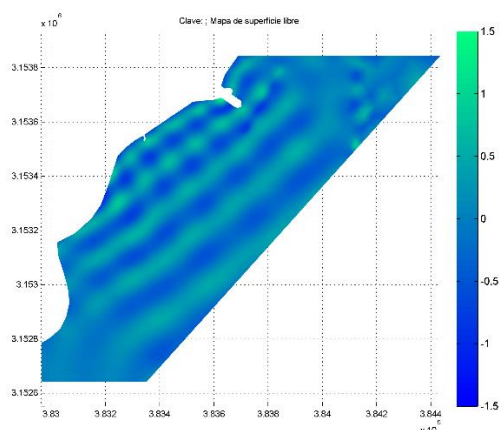


Figura 68: Elevación de la superficie del agua 27/08/2014

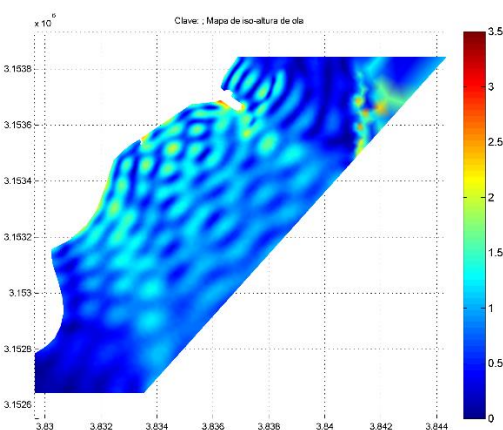


Figura 69: Altura significativa de ola 27/08/2014

3.3 Descripción del funcionamiento dinámico de los eventos

3.3.1 Propagación del oleaje

En este subapartado se concluye la respuesta que ejercen la forma del litoral y la batimetría en la propagación de las olas para cada uno de los Grupos de oleaje estudiados anteriormente. Por tanto, el objetivo es entender el modo en el que ocurren los rebases en San Andrés para poder plantear un diseño correcto de una estructura de protección costera.

En cuanto al Grupo 1, se recuerda que se caracteriza por un oleaje con direcciones cuyo rango oscila entre 90° y 140° y cuya limitación del *fetch* por longitud no permite desarrollar un oleaje de periodos altos. Este oleaje se caracteriza por ser de tipo *sea* con periodos de onda cortos. El oleaje proveniente del Este es relativamente paralelo a la batimetría de la bahía. En las simulaciones expuestas anteriormente se aprecia cómo el oleaje se refleja en la parte baja del modelo, en la zona de la curva que bordea la ladera de San Andrés. Esta reflexión provoca que la altura significativa de ola disminuya, lo que es causado principalmente debido a la disipación de energía en este fenómeno.

Por otro lado, el proceso de transformación principal que sufre el oleaje con dirección Este, es el proceso de asomeramiento, debido a que los trenes de olas se encuentran con un fondo que cambia de profundidad en dirección más o menos paralela a la trayectoria de las olas. Este proceso puede identificarse, debido a que la altura de olas en zonas de menor profundidad aumenta en comparación a la altura de las mismas olas en zonas profundas. Asimismo, cabe destacar que, el oleaje de componente Este no causa grandes corrientes longitudinales a lo largo de la costa. Los gráficos muestran también una zona de sombra (zona de menor altura de olas) causada por el dique semisumergido localizado en la zona frente a la playa de las Teresitas.

En el caso del Grupo 2, grupo de oleaje que se caracteriza por un importante componente *swell* de dirección puramente Sur con periodos elevados, los eventos de inundación son generalmente más dañinos, pues el comportamiento del oleaje es más “virulento” respecto del frente de la avenida marítima de San Andrés. Primero de todo, debido a la dirección del oleaje, este incide de manera perpendicular sobre la batimetría de San Andrés. Esta ortogonalidad provoca un cambio de dirección notable causada por fenómenos de refracción. Este proceso de transformación causa una tendencia de giro de las olas a orientarse según la bahía. Además, la combinación de los procesos de refracción y asomeramiento da lugar a un incremento en la altura de ola. Los oleajes que tienen una altura de ola igual a 1 m en aguas profundas se transforman dando lugar a olas de alturas mayores a 3 m al pie del paseo marítimo. Segundo, cuanto mayor es el periodo, mayor es el efecto de la encadenación de las olas y mayor es la energía asociada a estas. Por consecuencia, el oleaje incidente causa mayores rebases, y se confirman así las conclusiones del capítulo 2. Es decir, aunque el oleaje de componente Sur tenga una probabilidad de ocurrencia menor, causa inundaciones más perjudiciales.

Asimismo, el oleaje Sur, provoca una clara corriente longitudinal que se extiende paralelamente al litoral del Suroeste hacia el Noreste. Esta corriente longitudinal puede dar lugar a una sobreelevación de la superficie del agua hacia la zona de la Cofradía de Pescadores, y causar así mayores rebases en esta zona. Además, la presencia de una onda larga longitudinal de tipo infragravitatoria provoca el acople entre esta y las ondas cortas (por su alto periodo), causando un incremento muy importante en la amplitud de onda. Puede observarse en las gráficas un comportamiento similar al expuesto en el vídeo analizado en el capítulo 1 del evento de agosto



de 2011. Está claro que son 3 zonas concretas de la avenida marítima las que sufren mayores rebases, dado que es en estos puntos concretos donde se concentran mayores alturas de olas.

Finalmente, el oleaje del Grupo 3, oleaje con dirección Sureste, tiene un comportamiento mixto. Puede apreciarse cómo el modelo del Grupo 3 es una combinación de los modelos de los Grupos 1 y 2. Las inundaciones causadas en estos eventos son de menor relevancia, principalmente debido a una menor altura de ola (en comparación al oleaje puramente Sur) y un menor periodo. Además, la transformación del oleaje en su propagación, aun cuando está afectada por los procesos de asomeramiento y refracción, será menor. Esto implica que el giro que sufre el oleaje en su propagación es menor. Asimismo, y como se ha comentado en el caso del Grupo de oleaje 1, tiene lugar un fenómeno de reflexión en la zona de la ladera. Esta reflexión causa que la altura significativa de ola sea menor. Cabe destacar que, en el caso de este grupo, aunque existe una corriente longitudinal paralela a la costa en dirección Noreste, es más débil que en el caso anterior.

3.3.2 Caracterización del rebase de la estructura de la avenida marítima

La finalidad de esta sección es la de transformar cuantitativamente las características del oleaje ya propagado a aguas someras (altura de ola en el pie del paseo marítimo) a rebases. Esta transformación permite identificar los puntos más débiles y verificar la utilidad de la infraestructura.

El análisis realizado anteriormente se ha llevado a cabo considerando un nivel del mar de 2.7 m, debido a que las mayores inundaciones tienen lugar durante la pleamar. La cota de la avenida marítima de San Andrés (referida a la misma referencia) es de 3.5 m. Esto supone que, el francobordo de la avenida durante la pleamar es de 0.8 m, lo que significa que ocurren rebases incluso con oleajes de pequeña altura.

En este apartado se utiliza la ecuación propuesta por el EuroTop para obtener el caudal de rebase por metro lineal de infraestructura, el cual es también conocido como caudal de *overtopping*. La ecuación empleada es la propuesta por el código para realizar un análisis determinista. El caudal de rebase se relaciona directamente con el diseño o determinación de la altura (francobordo) de la estructura. El valor del caudal por metro lineal puede ser utilizado para determinar la importancia o peligrosidad de los rebases que sufre la avenida. Se muestra a continuación la ecuación utilizada y sus diferentes variables. Los factores a considerar para la determinación de *overtopping* son principalmente inducidos por la fricción del manto de material, el ángulo de la pendiente de la estructura, las bermas y el ángulo de ataque del oleaje.

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0.2 \cdot \exp\left(-2.3 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta}\right)$$

Donde:

q representa el caudal de rebase ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$).

g representa la aceleración gravitatoria (m/s^2).

H_{m0} representa la altura de ola medida en el pie de la estructura (m).

R_c es el francobordo de la infraestructura (m), en este caso igual a 0.8 m.

γ_f se conoce como el coeficiente de fricción de la estructura. En este caso se considera igual a 0.55, pues la estructura de la avenida marítima está formada por rocas.

γ_β es el coeficiente del ángulo de ataque. En el caso de estudio se asume un valor igual a 1, debido a que representa el caso más desfavorable.

Se realiza el análisis de los rebases para los eventos ocurridos en San Andrés mediante la altura de ola obtenida en el modelo numérico para 6 puntos distribuidos a lo largo de la avenida marítima. Estos puntos son equidistantes entre sí y se utilizan como boyas virtuales para obtener valores concretos.

Se muestran a continuación mediante gráficas las alturas de ola registradas en cada uno de los puntos durante cada uno de los eventos y el valor de caudal de rebase obtenido a partir de la ecuación del EuroTop.

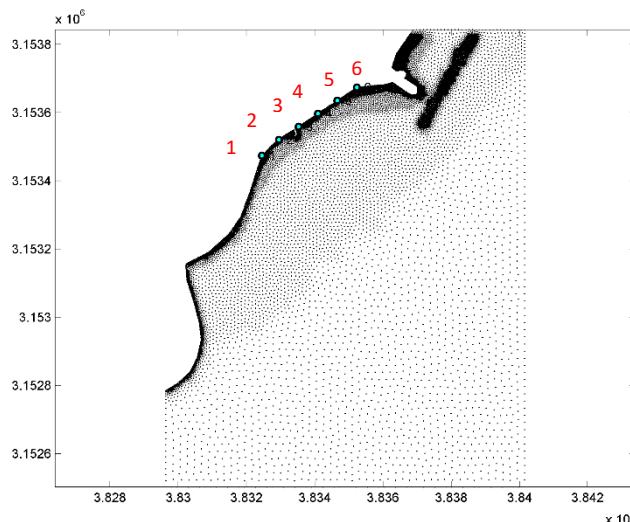


Figura 70: Distribución de puntos de control en la avenida marítima de San Andrés

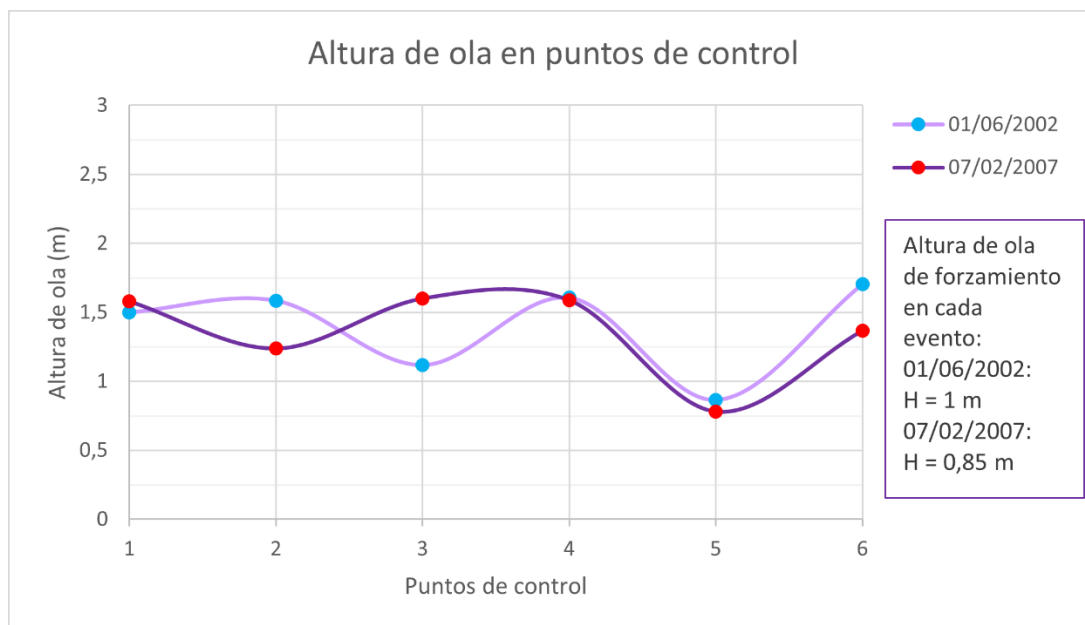


Gráfico 1: Altura de ola en puntos de control para Grupo de oleaje 1

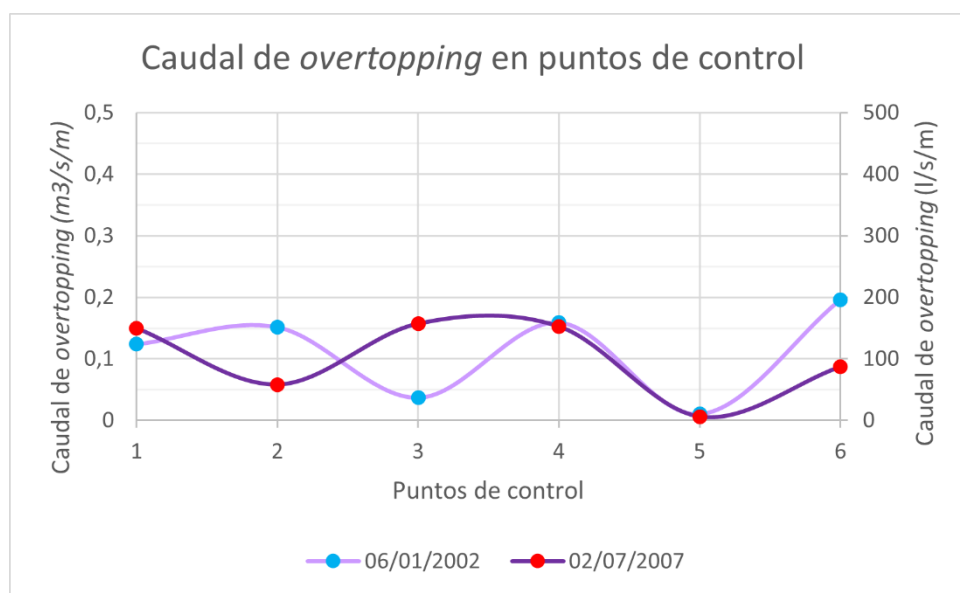


Gráfico 2: Caudal de *overtopping* en puntos de control para Grupo de oleaje 1

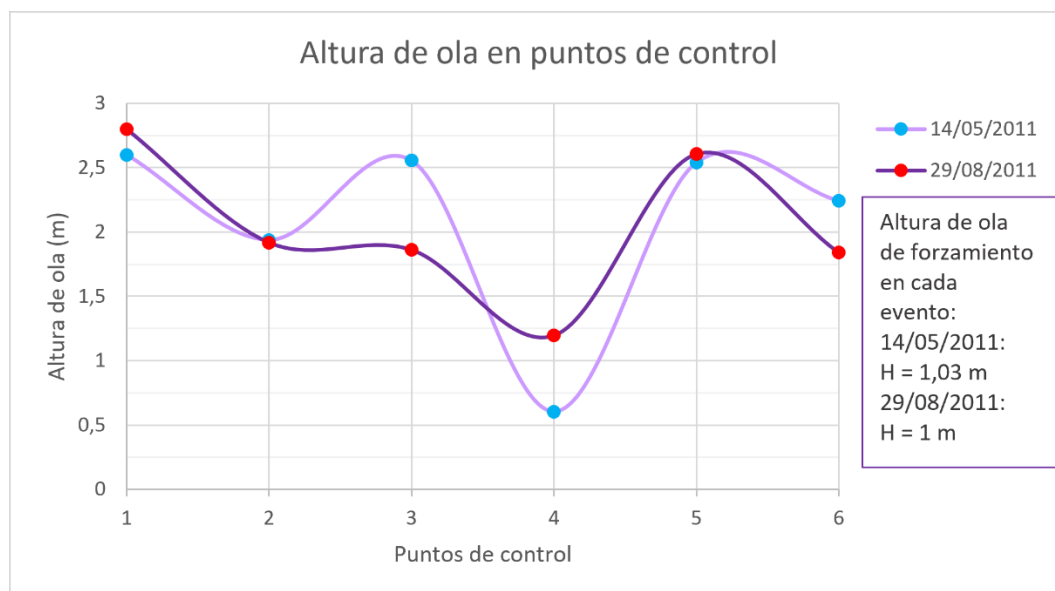


Gráfico 3: Altura de ola en puntos de control para Grupo de oleaje 2

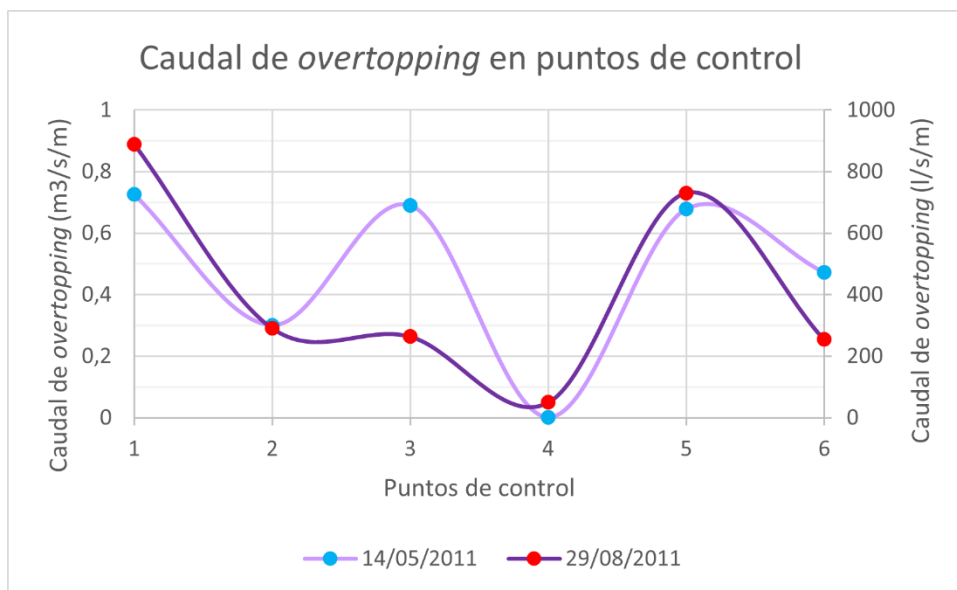
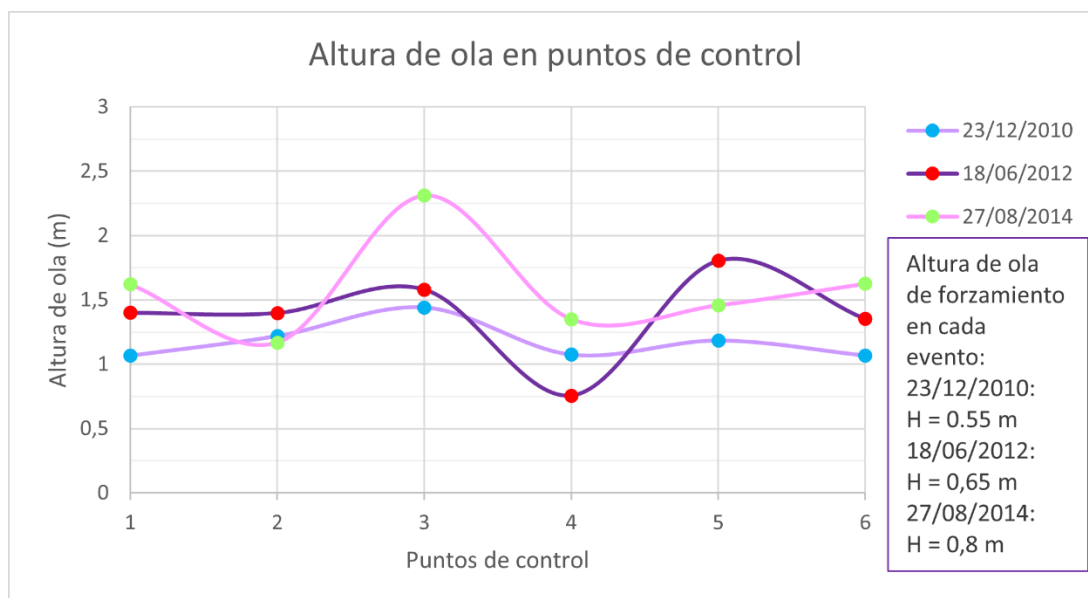
Gráfico 4: Caudal de *overtopping* en puntos de control para Grupo de oleaje 2

Gráfico 5: Altura de ola en puntos de control para Grupo de oleaje 3

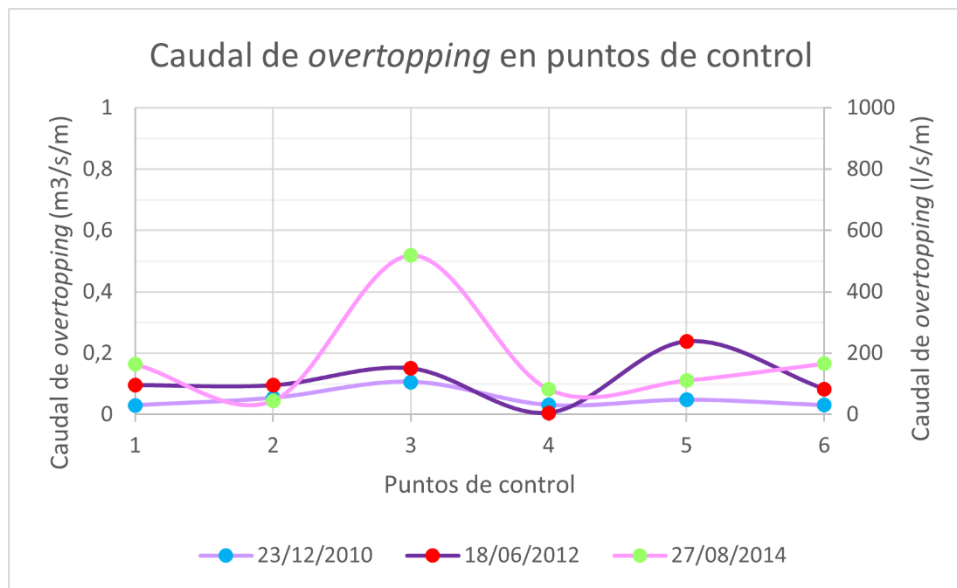


Gráfico 6: Caudal de overtopping en puntos de control para Grupo de oleaje 3

El EuroTop establece por norma general los siguientes valores de referencia para el caudal de *overtopping* expresado en litros/s por metro lineal de estructura.

- $q < 0.1$ l/s/m: caudal insignificante con respecto a la resistencia de la cresta y parte posterior de la estructura.
- $q = 1$ l/s/m: en la cresta y las pendientes interiores la hierba y/o arcilla pueden comenzar a erosionarse.
- $q = 10$ l/s/m: desbordamiento significativo para diques.
- $q = 100$ l/s/m: la cresta y pendientes interiores de los diques deben protegerse con asfalto u hormigón. Para los rompeolas de escollera se pueden generar ondas transmitidas.

Asimismo, los procesos y peligros de rebase son:

- Peligro directo de lesiones o muerte para las personas inmediatamente detrás de la estructura de defensa.
- Daños a la propiedad, operación y/o infraestructura en el área defendida, incluida la pérdida de recursos económicos, ambientales o de otro tipo, o la interrupción de una actividad o proceso económico.
- Daños a la estructura de defensa, ya sea a corto o largo plazo, con posibilidad de ruptura e inundación.
- Inundaciones de poca profundidad (inconvenientes pero no peligrosas).

Por otro lado, el código establece ciertos límites para el valor del caudal de *overtopping* atendiendo a la seguridad operativa de la estructura. Se determina que para estructuras en talud 0.3 l/s/m (0.0003 m³/s/m) es el límite que marca peligrosidad para peatones, siendo la situación extremadamente peligrosa a partir de 6 l/s/m (0.006 m³/s/m). Para los vehículos, la norma dicta que a partir de 0.6 l/s/m (0.0006 m³/s/m) el tránsito es peligroso a cualquier velocidad.

Grupo de oleaje	Evento	q_{\max} registrado (m ³ /s/m)	q_{\max} registrado (l/s/m)	Punto de control de q_{\max}	q_{\limite} por código (l/s/m)
Grupo 1 – Este	06/01/2002	0.19614	196.14	6	0.3
	02/07/2007	0.15681	156.81	3	0.3
Grupo 2 – Sur	14/05/2011	0.72529	725.29	1	0.3
	29/08/2011	0.8886	888.6	1	0.3
Grupo 3 - Sureste	23/12/2010	0.10598	105.98	3	0.3
	18/06/2012	0.2379	237.9	5	0.3
	27/08/2014	0.51857	518.57	3	0.3

Tabla 7: Comparativa de los rebases para los eventos

Si se comparan estos valores con los obtenidos para los rebases en cada uno de los eventos de San Andrés, se observa que claramente los valores medidos *in-situ* son bastante superiores a los límites establecidos por el código. Por tanto, queda claro que una protección es necesaria para proteger la avenida marítima del oleaje incidente. Se estudian diferentes alternativas de estructuras de protección en el siguiente capítulo.

4. PROPUESTA DE ALTERNATIVAS

En los capítulos anteriores se ha concluido que es necesaria una estructura de protección para resguardar la avenida marítima de San Andrés del oleaje incidente. En este capítulo, se estudian posibles alternativas y se itera hasta asegurar que estas son efectivas ante cualquier oleaje que tenga lugar en la zona de estudio.

4.1 Metodología

En este subapartado se describe la metodología seguida a la hora de realizar la propuesta de diversas alternativas de protección.

El primer paso, es determinar la altura máxima de olas que pueden registrarse al pie de la avenida marítima de San Andrés. Esto se realiza siguiendo un procedimiento inverso al utilizado en el capítulo anterior para obtener el caudal de rebase. En este caso, se establece el límite para el caudal de overtopping máximo atendiendo a la seguridad de los peatones (por su mayor vulnerabilidad), y se obtiene a partir de ese límite la altura de ola máxima.

Una vez obtenida la altura de ola, se proponen diferentes estrategias para disminuir el efecto de los oleajes de los distintos Grupos de manera independiente. Esto se lleva a cabo analizando diversas estructuras únicamente ante los eventos más importantes acaecidos en San Andrés. Es decir, la efectividad de las estrategias se comprueba sometiendo estas a los eventos de inundación de dirección Este (evento del 07/02/2007) y de dirección Sur (evento del 14/05/2011) que provocan las mayores alturas de ola a pie de avenida marítima y por tanto mayores valores del caudal de *overtopping*. Habiendo deducido cómo hacer frente a los diferentes comportamientos hidrodinámicos, se combinan varias estrategias con el fin de dar con un par de alternativas efectivas. Ambas alternativas se someten una vez más a análisis, y posteriormente se escoge una única estructura como solución definitiva el último capítulo del TFG. La construcción de esta solución definitiva se procede a estudiar en el TFG de la mención de construcción.

En el análisis, se itera y comprueba que la solución propuesta es válida para los diferentes oleajes a los que está expuesto San Andrés. Este proceso se lleva a cabo utilizando el modelo MSP para obtener alturas de ola a pie de estructura y obtener dimensiones y forma en planta aproximada de la solución propuesta. La primera iteración se realiza aplicando oleajes del Grupo 2, oleajes de dirección Sur, debido a que son los más peligrosos y los que mayor altura de ola provocan. Una vez, se compruebe que la estructura es eficiente ante estos oleajes, se verifica para oleajes de dirección Este y Sureste.

Las estructuras propuestas pueden ser de tipo dique exento o espigón. La mayor diferencia entre ambas estructuras reside en que el dique exento se coloca separado de la costa, habitualmente paralela a esta, y el espigón es una continuación de la misma costa, siendo en alguna manera perpendicular a esta.



4.2 Limitaciones de diseño

Como se ha comentado anteriormente, la variable que condiciona el diseño de las estructuras de abrigo es el caudal de rebase de la avenida de San Andrés. El límite superior de caudal de overtopping se fija en 0.3l/s/m (0.0003 m³/s/m). Por tanto, mediante la ecuación del EuroTop se obtiene que la altura máxima de ola debe de ser menor a:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0.2 \cdot \exp\left(-2.3 \frac{R_C}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta}\right)$$

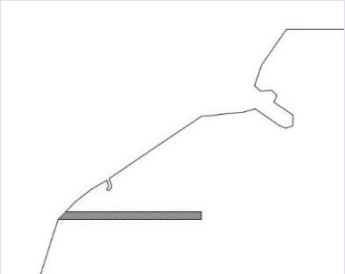
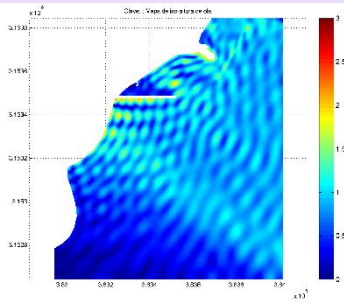
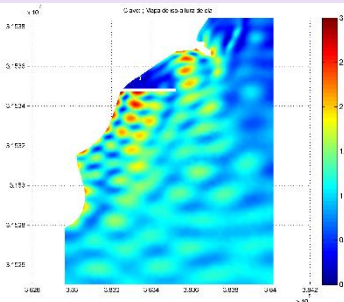
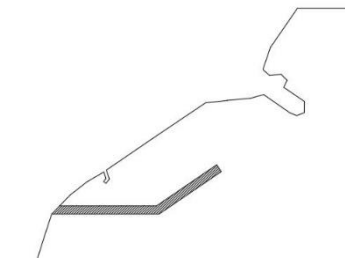
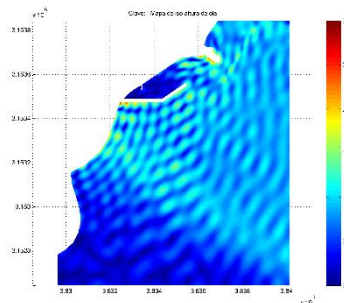
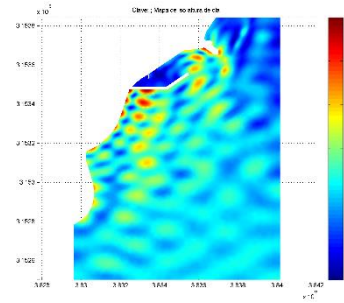
$$\frac{0.0003}{\sqrt{9.81 \cdot H_{m0}^3}} = 0.2 \cdot \exp\left(-2.3 \frac{0.8}{H_{m0} \cdot 0.55 \cdot 1}\right) \rightarrow H_{m0} \leq 0.505 \text{ m}$$

Por tanto, la altura máxima de ola que puede ser registrada en cualquier punto de la avenida debe de ser igual o menor a 0.505 m.

4.3 Planteamiento de estrategias

La estrategia empleada en este apartado a la hora de plantear diversas soluciones que hagan frente a los problemas de inundación en San Andrés se concentra en torno a dos ideas principales.

- Estrategia A: Bloqueo de olas. Una de las estrategias comúnmente empleadas para solucionar problemas causados por rebases, es el de bloquear las olas. Con ello se pretende reducir el impacto o incidencia de las olas más perjudiciales. En el caso de estudio, esta estrategia pretende reducir la propagación de olas de dirección Sur y dirección Este desde aguas profundas a aguas someras.
- Estrategia B: Compartimentación de la costa. Se ha venido observando que una de las razones por las que los oleajes de dirección Sur son responsables de grandes inundaciones en San Andrés, es debido al acoplamiento de ondas largas con ondas cortas de alto periodo. Por tanto, el objetivo de compartimentar la costa es dividir las ondas largas, evitando así el acoplamiento con olas de longitud menor. Con ello, se consigue reducir el incremento en amplitud de ola generada por este fenómeno de acoplamiento. Esta estrategia es especialmente efectiva para reducir el impacto de los oleajes del Sur, pues son estos los más relacionados con el fenómeno descrito.

Esquema	Descripción	Agitación frente a oleaje del Este (evento 07/02/2007)	Agitación frente a oleaje del Sur (evento 14/05/2011)	Comentarios
<div>Estrategia 1</div> <div></div> <div><i>Figura 71: Esquema de la planta de la Estrategia 1</i></div>	<p>En la primera estrategia se plantea un espigón con dirección Este-Oeste. La estructura avanza hasta la perpendicular lanzada desde la zona de la Cofradía de Pescadores en la avenida marítima. El espigón es una estructura de tipo dique en talud de materiales sueltos, y por tanto el coeficiente de reflexión se fija en 0.3 para toda su longitud.</p>	<div></div> <div><i>Figura 72: Altura significativa de ola (Este)</i></div>	<div></div> <div><i>Figura 73: Altura significativa de ola (Sur)</i></div>	<p>El espigón crea una zona de sombra en su lado Norte, debido a la reflexión y refracción de las olas. Esta estrategia es especialmente eficiente para reducir la altura de olas de dirección sur en la parte baja de la avenida. Sin embargo, no obstaculiza la propagación de oleaje del Este u oleaje del Sur hacia la zona de la Cofradía de Pescadores.</p>
<div>Estrategia 2</div> <div></div> <div><i>Figura 74: Esquema de la planta de la Estrategia 2</i></div>	<p>Como segunda estrategia se plantea un espigón compuesto por dos partes diferenciadas. En la primera parte, este avanza con dirección Este-Oeste. En su segunda parte avanza siendo paralelo a la avenida marítima. La estructura avanza hasta la perpendicular lanzada desde la zona de la Cofradía de Pescadores en la avenida marítima. El espigón es una estructura de tipo dique en talud de materiales sueltos, y por tanto el coeficiente de reflexión se fija en 0.3 para toda su longitud.</p>	<div></div> <div><i>Figura 75: Altura significativa de ola (Este)</i></div>	<div></div> <div><i>Figura 76: Altura significativa de ola (Sur)</i></div>	<p>El espigón crea una zona de sombra en su lado Norte, debido a la reflexión y refracción de las olas. Esta estrategia es más eficiente que la estrategia 1, tanto para reducir la altura del oleaje de dirección Este como Sur. Sin embargo, no obstaculiza totalmente la propagación de oleaje del Este u oleaje del Sur hacia la zona de la Cofradía de Pescadores, donde se registran alturas de ola mayores a las máximas establecidas según el código.</p>



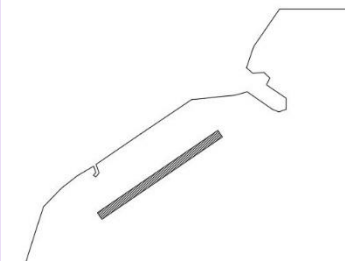
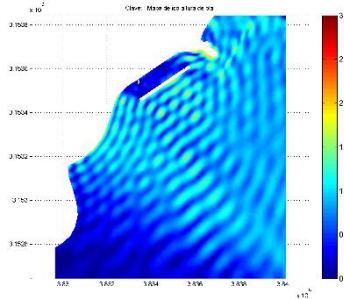
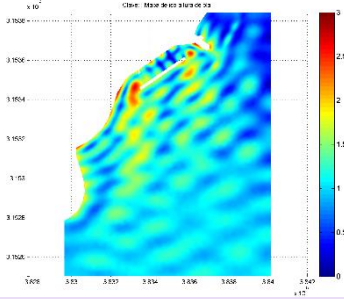
Esquema	Descripción	Agitación frente a oleaje del Este (evento 07/02/2007)	Agitación frente a oleaje del Sur (evento 14/05/2011)	Comentarios
<p>Estrategia 3</p>  <p>Figura 77: Esquema de la planta de la Estrategia 3</p>	<p>En la tercera estrategia se plantea un dique exento con dirección Suroeste-Noreste que avanza paralelamente a la avenida marítima en toda su longitud. El dique exento es una estructura de tipo dique en talud de materiales sueltos, y por tanto el coeficiente de reflexión se fija en 0.3 para toda su longitud.</p>	 <p>Figura 78: Altura significativa de ola (Este)</p>	 <p>Figura 79: Altura significativa de ola (Sur)</p>	<p>El dique exento crea una zona de sombra hacia la costa, debido a la reflexión y refracción de las olas. Esta estrategia es más eficiente que las planteadas anteriormente para hacer frente a los oleajes de dirección Este. No obstante, no evita la propagación hacia la avenida de las olas de dirección Sur. Esto implica que especialmente que las alturas de olas registradas a pie de paseo marítimo exceden las máximas alturas establecidas anteriormente.</p>

Tabla 8: Resumen de las diversas estrategias planteadas para el diseño de la estructura de abrigo

4.3.1 Conclusiones de las estrategias

En este apartado se analizan las estrategias planteadas anteriormente para el diseño de estructuras de abrigo, con el fin de encaminar el análisis hacia las dos alternativas finalistas. Una vez establecido con cuál de las dos alternativas se consiguen resultados más óptimos, se determina la planta de la solución definitiva y se procede a realizar un análisis completo del comportamiento hidrodinámico de la costa de San Andrés ante diversos oleajes.

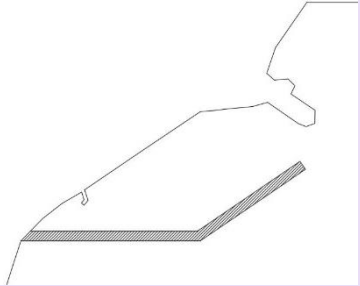
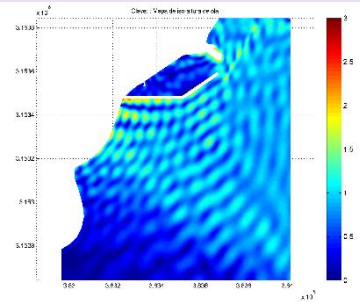
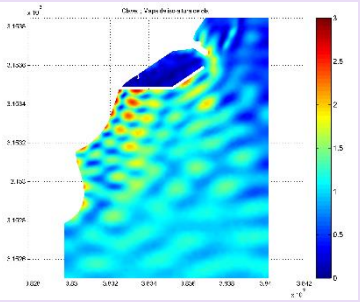
En cuanto a la idea de diseño que se basa en realizar un bloqueo en la propagación de las olas, se demuestra que tanto la estrategia 2 como la estrategia 3 son efectivas. Ambas estrategias bloquean de forma paralela u oblicua la costa ante oleajes de dirección Este o Sur. La primera estrategia es efectiva de manera local, debido a que bloquea únicamente de manera parcial a los oleajes de dirección Sur. Por tanto, se concluye que esta primera estrategia no cumple todos los requisitos que debe de cumplir la estructura de protección definitiva.

Asimismo, puede observarse que la estrategia 2 necesita una alteración para ser capaz de proteger la zona de la Cofradía de Pescadores de la avenida marítima. Una de las alternativas que se proponen a continuación tiene una planta muy similar a la estrategia 2, pero con el fin de aumentar la extensión de la zona de sombra que la estructura provoca, se alarga el brazo del espigón que avanza en dirección Este-Oeste de manera oblicua a la avenida. Además, una de las principales ventajas de esta alternativa es su capacidad para quebrar la propagación de la onda longitudinal a la costa.

Finalmente, en la tabla expuesta anteriormente queda clara la efectividad de la estrategia 3 a la hora de bloquear las olas del Este o del Sur. Sin embargo, esta estrategia debe modificarse para reducir el incremento de la amplitud de onda provocado por la presencia de una onda larga longitudinal a la costa. La segunda alternativa propuesta es por tanto una estructura en forma de T, en la cual el dique exento se une a la avenida marítima por su zona central. Esta unión compartimenta la propagación de olas, haciendo así frente a la onda longitudinal.



4.4 Planteamiento de las alternativas finalistas

Esquema	Descripción	Agitación frente a oleaje del Este (evento 07/02/2007)	Agitación frente a oleaje del Sur (evento 14/05/2011)	Comentarios
<p>Alternativa 1</p>  <p><i>Figura 80: Esquema de la planta de la Alternativa 1</i></p>	<p>La primera alternativa es una modificación de la estructura planteada en la segunda estrategia. Se plantea un espigón compuesto por dos partes diferenciadas. En la primera parte, este avanza con dirección Este-Oeste. La primera sección del espigón avanza hasta la perpendicular lanzada desde el final de la avenida marítima. En su segunda parte avanza siendo paralelo a la avenida marítima hasta la altura del espigón que separa la avenida de la playa de Las Teresitas. El espigón es una estructura de tipo dique en talud de materiales sueltos, y por tanto el coeficiente de reflexión se fija en 0.3 para toda su longitud.</p>	 <p><i>Figura 81: Altura significativa de ola (Este)</i></p>	 <p><i>Figura 82: Altura significativa de ola (Sur)</i></p>	<p>El espigón crea una zona de sombra en su lado Norte, debido a la reflexión y refracción de las olas. Esta zona de sombra es más amplia que la causada por la estructura planteada en la estrategia 2, debido a la mayor longitud de la estructura en este caso. La modificación de la longitud de la estructura aumenta su efectividad principalmente ante oleajes de dirección Este. Puede verse en las gráficas que se mantiene su utilidad ante el oleaje Sur, ya que bloquea la propagación de las olas y compartimenta la costa reduciendo el efecto de la onda larga longitudinal.</p>

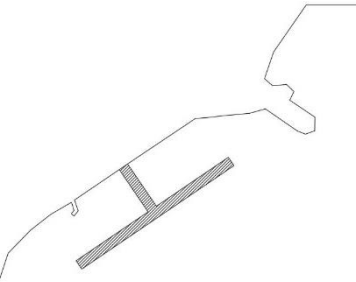
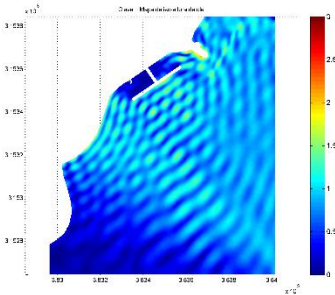
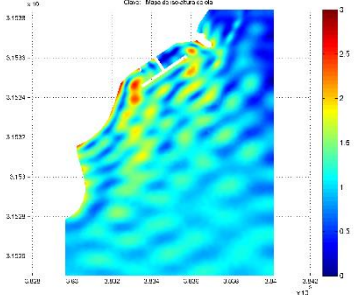
Esquema	Descripción	Agitación frente a oleaje del Este (evento 07/02/2007)	Agitación frente a oleaje del Sur (evento 14/05/2011)	Comentarios
<p>Alternativa 2</p> 	<p>La segunda alternativa es una modificación de la estructura planteada en la tercera estrategia. Se plantea ahora un espigón, pues está unido por su parte central a la avenida marítima. La estructura está compuesta por dos partes diferenciadas. La primera parte es perpendicular a la avenida y avanza hasta el dique exento planteado en la estrategia 3. La segunda parte de la estructura tiene una planta muy similar al dique exento planteado en la estrategia 3. Esta parte avanza en dirección Suroeste-Noreste (paralelamente a la avenida marítima) en toda su longitud. El espigón es una estructura de tipo dique en talud de materiales sueltos, y por tanto el coeficiente de reflexión se fija en 0.3 para toda su longitud.</p>			<p>El dique exento crea una zona de sombra hacia la costa, debido a la reflexión y refracción de las olas. Esta alternativa es ligeramente más eficiente que el dique exento planteado en la estrategia 3 frente a oleajes de dirección Sur. Debido a que principalmente compartimenta la costa y reduce la altura de ola al pie de la avenida marítima especialmente hacia la zona de la Cofradía de Pescadores. No obstante, no reduce por completo la altura de las olas incidentes de dirección Sur en la zona baja de la avenida. Asimismo, puede verse en las gráficas que se mantiene la utilidad de la estructura ante el oleaje Este, ya que bloquea la propagación de las olas hacia aguas someras.</p>

Tabla 9: Resumen de las diversas alternativas planteadas para el diseño de la estructura de abrigo



4.4.1 Conclusiones de las alternativas finalistas

En esta sección se valoran las dos alternativas planteadas con el fin de seleccionar la más adecuada y proceder a su total análisis para concluir este TFG de la mención de hidrología. La valoración se realiza llevando a cabo un análisis en el que se efectúa una comparación multicriterio de ambas alternativas. Este método permite seleccionar una de las alternativas como diseño finalista valorando distintos criterios de manera objetiva. Asimismo, estos criterios permiten obtener una solución óptima para hacer frente a los problemas de inundaciones en San Andrés.

Los aspectos principales a valorar en el análisis multicriterio son:

- Aspecto económico: cuanto más barata sea la construcción del diseño propuesto mejor, debido a que esto supone una mayor rapidez a la hora de amortizar la inversión inicial. A su vez, el criterio económico está relacionado con el proceso constructivo y el volumen de material a utilizar. Por norma general, a mayor sencillez de construcción, mayor rentabilidad económica. Asimismo, el volumen de material depende tanto de la profundidad de la estructura de abrigo (profundidad media y máxima) y el área en planta.
- Aspecto constructivo: este criterio considera la facilidad constructiva de la estructura, así como la organización de la obra y calendario. Como se ha venido mencionando, el problema de las inundaciones en San Andrés se repite periódicamente y causa grandes daños materiales y económicos. Por tanto, es de vital importancia que la rapidez durante la construcción de la infraestructura sea la mayor posible. Ha de mencionarse que, debido a los avances tecnológicos y la sencillez de ambas propuestas, estas no suponen un reto ante la tecnología y maquinaria de construcción disponible. Asimismo, el aspecto constructivo hace referencia también a la ubicación de materiales y la seguridad de la obra.
- Aspecto funcional: en este criterio se considera la efectividad de la estructura para cumplir su objetivo. Por tanto, se considera la disipación del oleaje y la reducción de la altura de ola a pie de avenida marítima.
- Aspecto medioambiental: aun siendo el principal objetivo de la estructura de abrigo la disipación del oleaje, este propósito debe de llevarse a cabo causando el menor impacto medioambiental posible. Dentro del criterio medioambiental se valoran tanto el impacto sobre el medio físico como el impacto al medio biótico. Esto supone, que debe de prestarse gran atención a los problemas derivados del estancamiento de aguas.

En la tabla a continuación se comparan ambas alternativas propuestas y se señala con una “X” para cada uno de los criterios cual es la mejor alternativa. Además, se acompaña con un comentario explicativo que especifica la razón tras la elección.

Criterio // Alternativa	Alternativa 1	Alternativa 2	Comentario
Económico		X	Como se ha mencionado anteriormente, el aspecto económico se relaciona tanto con la rapidez de ejecución de la obra como con el volumen de material a emplear. Por una parte, debido a la mayor rapidez de construcción, la alternativa 2 es más rentable. Por otra parte, el volumen de material a utilizar es menor, principalmente por dos razones: el área en planta es menor y la profundidad media y máxima del dique son menores (como la estructura se sitúa a una distancia menor de la avenida marítima y paralelamente a esta, la cota batimétrica que se alcanza no es tan profunda como en el caso de la alternativa 1). Por todo ello, se establece que la segunda alternativa implica un tiempo menor para amortizar la inversión inicial del proyecto.
Constructivo		X	En cuanto al aspecto constructivo, reparando a la disposición de materiales o la accesibilidad a la obra, ambas alternativas son muy similares debido a que las dos alternativas permiten el acceso por vía terrestre. Asimismo, la avenida marítima de San Andrés cuenta con dos carriles en cada uno de los sentidos del tráfico, y por tanto ambas alternativas permiten mantener un tráfico fluido en mayor o menor medida. Sin embargo, debido a la forma en planta de la segunda alternativa, se establece que la construcción de la estructura conlleva menor tiempo. Esto se debe principalmente a que, aunque la estructura tiene un carácter lineal, una vez construida la parte de unión del dique exento con la avenida marítima, la construcción del dique puede realizarse en ambas direcciones de manera simultánea.
Funcional	X		Ambas estructuras han sido analizadas mediante el modelo MSP en el que han sido sometidas a los oleajes más perjudiciales para el pueblo de San Andrés (Oleaje del Grupo 1 – Este y Oleaje del Grupo 2 – Sur). Teniendo en cuenta los resultados de agitación obtenidos, la alternativa 1 reduce en mayor medida la altura de ola registrada a pie de paseo marítimo, especialmente en el caso del oleaje del Sur. Por tanto, puede determinarse que esta primera estructura, es mejor en cuanto a aspecto funcional se refiere.
Medioambiental		X	Se considera que la alternativa 2 supone un impacto medioambiental menor por dos razones. Primero, esta solución modifica en menor medida el comportamiento del oleaje. Asimismo, permite la propagación longitudinal de las olas (sin obstáculos) hasta su parte central e incluso permite atravesar el espigón si se trata de un dique de baja cota de coronación. Segundo, debido a la mayor apertura de la costa con esta segunda alternativa, las corrientes facilitan la renovación de aguas y por consiguiente se reduce la posibilidad de ocurrencia de problemas relacionados con aguas estancadas. Ambas razones se estiman suficientes para argumentar que la segunda solución es más beneficiosa que la primera para los ecosistemas de la zona.

Tabla 10: Comparación multicriterio de ambas alternativas propuestas



Por lo mencionado anteriormente, y debido a la clara superioridad de la segunda alternativa en el análisis multicriterio, se determina que la alternativa 2 es la solución definitiva. En el siguiente capítulo se realiza el modelaje y análisis completo de esta estructura frente a los distintos grupos de oleaje y se estudian los caudales de overtopping obtenidos en los puntos de control de la avenida marítima. Esta solución es también por tanto la que se procede a construir en el TFG de la mención de construcción.

5. CONCLUSIONES GENERALES Y ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN DEFINITIVA



5.1 Modelaje de la solución definitiva

A continuación, se muestra el montaje de los tres dominios numéricos utilizados para comprobar la efectividad de la estructura de abrigo planteada. Este proceso se realiza de forma análoga al modelaje llevado a cabo en el capítulo 3.

5.1.1 Modelo oleaje del Grupo 1 – Este

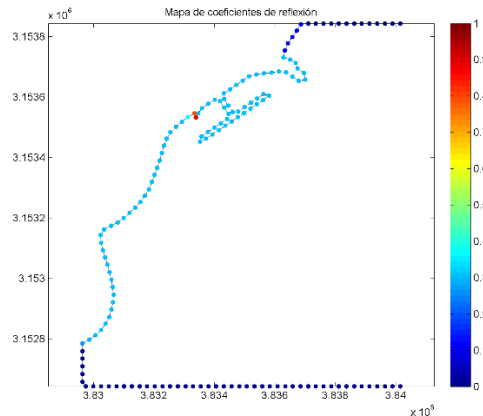


Figura 86: Coeficientes de reflexión del contorno para oleaje del Grupo 1 - Este

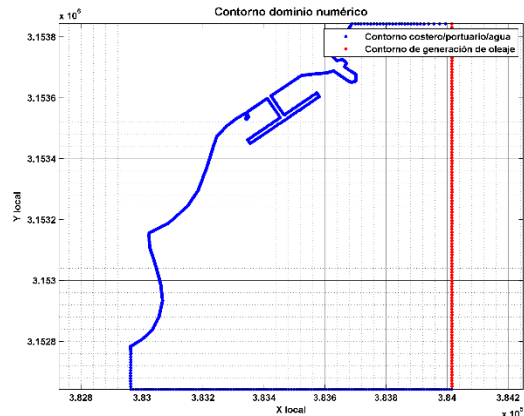


Figura 87: Contorno para el oleaje del Grupo 1 - Este

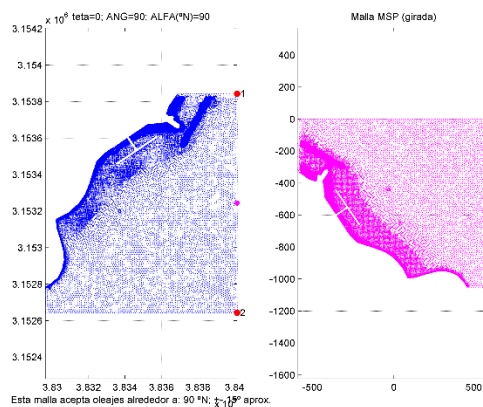


Figura 88: Malla MEF para el oleaje del Grupo 1 - Este

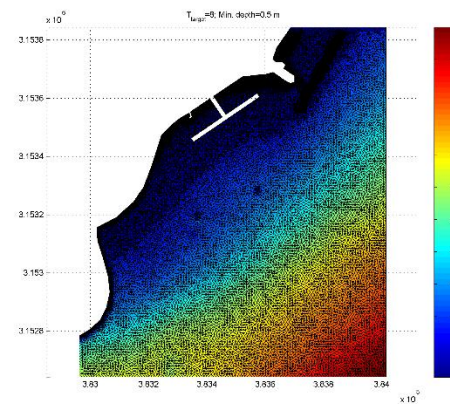


Figura 89: Malla MEF ajustada a la batimetría para el oleaje del Grupo 1 - Este

5.1.2 Modelo oleaje del Grupo 2 – Sur

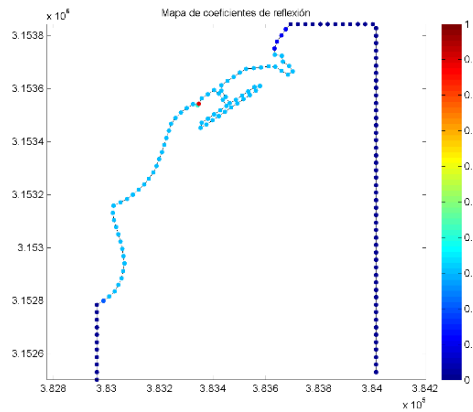


Figura 90: Coeficientes de reflexión del contorno para oleaje del Grupo 2 - Sur

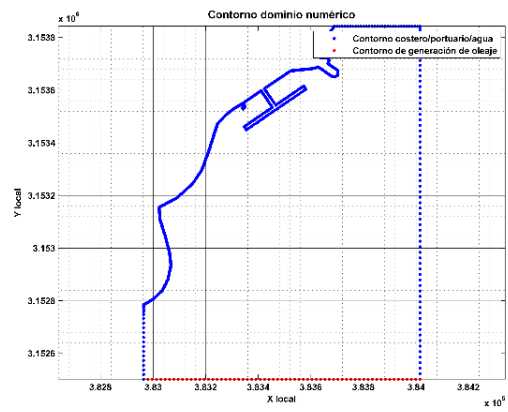


Figura 91: Contorno para el oleaje del Grupo 2 - Sur

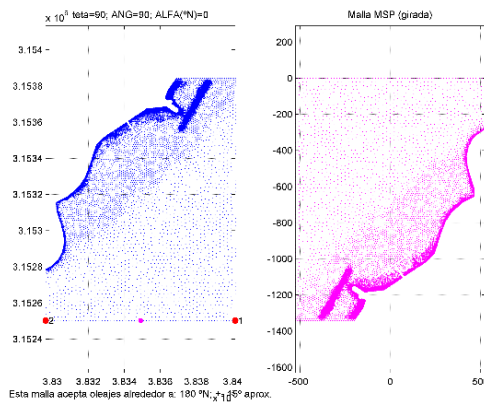


Figura 92: Malla MEF para el oleaje del Grupo 2 - Sur

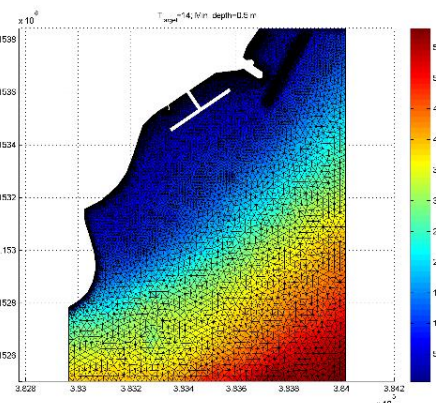


Figura 93: Malla MEF ajustada a la batimetría para el oleaje del Grupo 2 - Sur



5.1.3 Modelo oleaje del Grupo 3 – Sureste

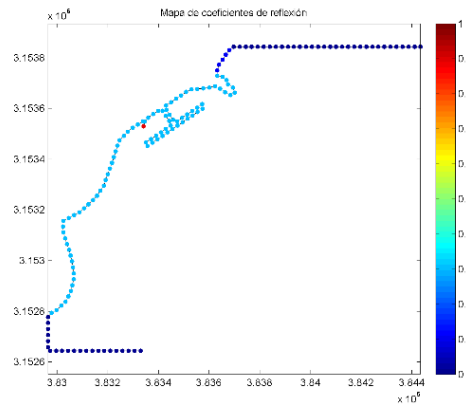


Figura 94: Coeficientes de reflexión del contorno para oleaje del Grupo 3 - Sureste

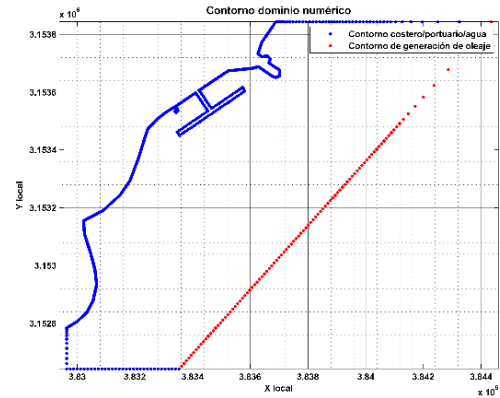


Figura 95: Contorno para el oleaje del Grupo 3 - Sureste

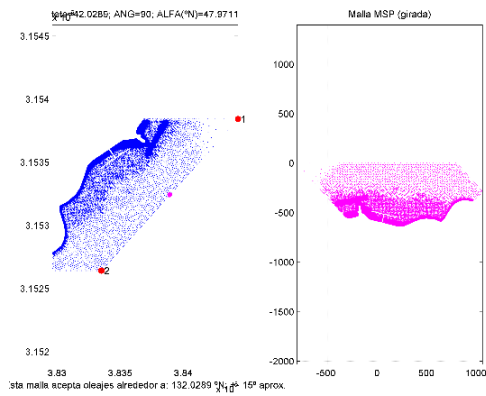


Figura 96: Malla MEF para el oleaje del Grupo 3 - Sureste

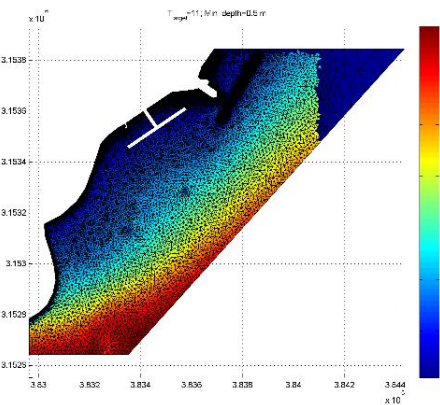


Figura 97: Malla MEF ajustada a la batimetría para el oleaje del Grupo 3 - Sureste

5.2 Resultados de agitación de la solución definitiva

5.2.1 Grupo 1 – Oleaje del Este

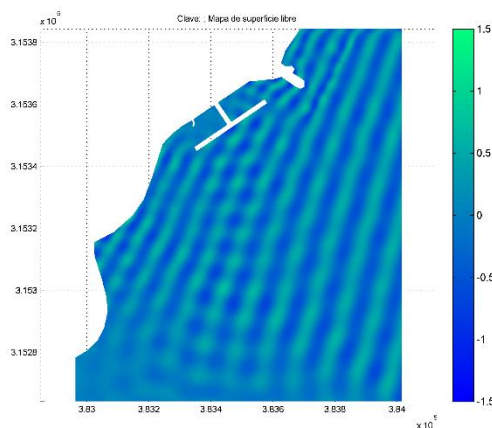


Figura 98: Elevación de la superficie del agua 06/01/2002

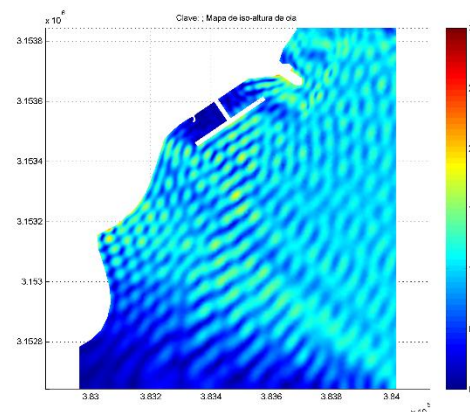


Figura 99: Altura significativa de ola 06/01/2002

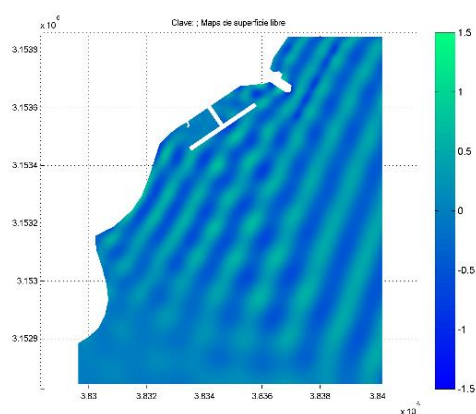


Figura 100: Elevación de la superficie del agua 02/07/2007

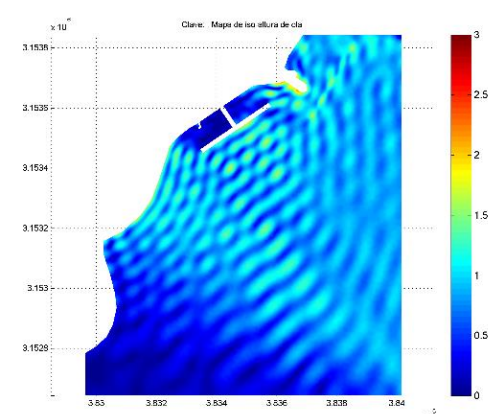


Figura 101: Altura significativa de ola 02/07/2007

Puede verse en los resultados del modelo, que, como se ha venido mencionando, la solución de estructura de abrigo escogida es efectiva frente a oleajes de dirección Este. El dique bloquea por completo estos oleajes, creando una zona de sombra que abarca toda la longitud de la avenida marítima. Por consiguiente, se reducen oleajes incidentes caracterizados por una altura de ola entorno al metro, a alturas de ola a pie de avenida iguales o menores a 0.5 m.



5.2.2 Grupo 2 – Oleaje del Sur

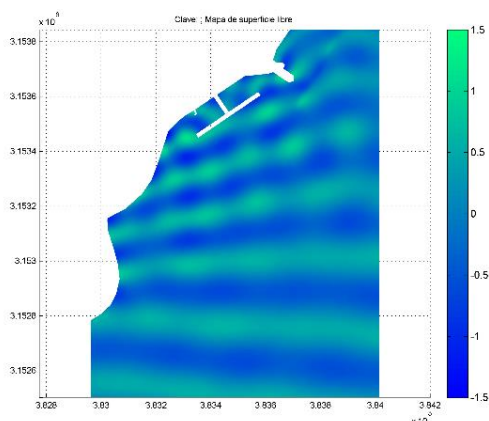


Figura 102: Elevación de la superficie del agua 14/05/2011

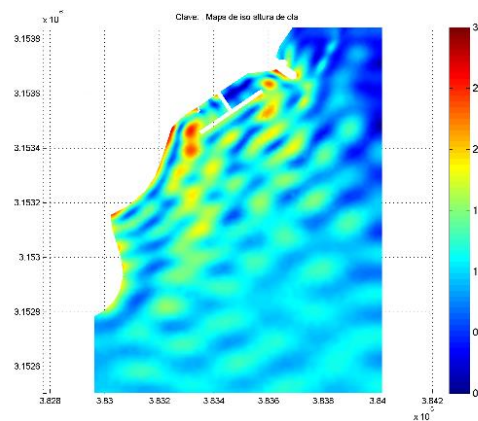


Figura 103: Altura significativa de ola 14/05/2011

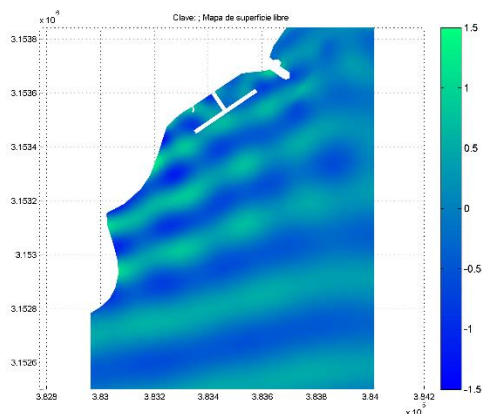


Figura 104: Elevación de la superficie del agua 29/08/2011

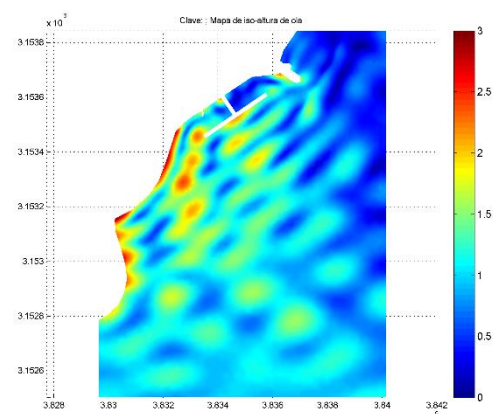


Figura 105: Altura significativa de ola 29/08/2011

Puede verse en los resultados del modelo, que, como se ha venido mencionando, la solución de estructura de abrigo escogida no reduce por completo los oleajes incidentes de dirección Sur. Cabe mencionar que estos oleajes son los más agresivos respecto de la costa. Pues, como se ha identificado anteriormente, los largos periodos provocan una onda longitudinal a la costa. El dique bloquea principalmente la zona media a alta de la avenida, es decir, la zona donde se localiza la Cofradía de Pescadores. Las olas de mayor altura que se localizan en la parte baja de la avenida, aun siendo mayores a las recomendadas por el código, son menores que las registradas cuando el análisis se efectúa sin estructura de protección. Por tanto, puede concluirse que, aunque la estructura no logre bloquear por completo la propagación, sí llega a ser efectiva a la hora de reducir el tamaño de estas.

5.2.3 Grupo 3 – Oleaje del Sureste

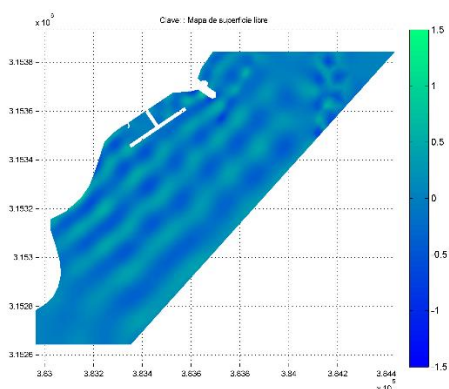


Figura 106: Elevación de la superficie del agua
23/12/2010

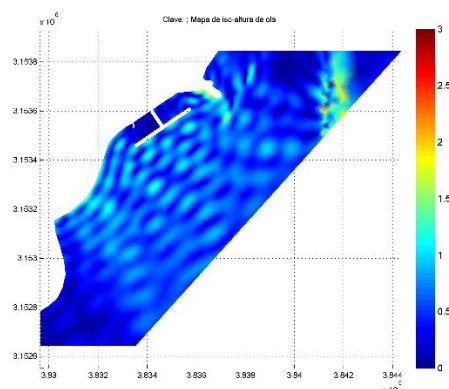


Figura 107: Altura significativa de ola 23/12/2010

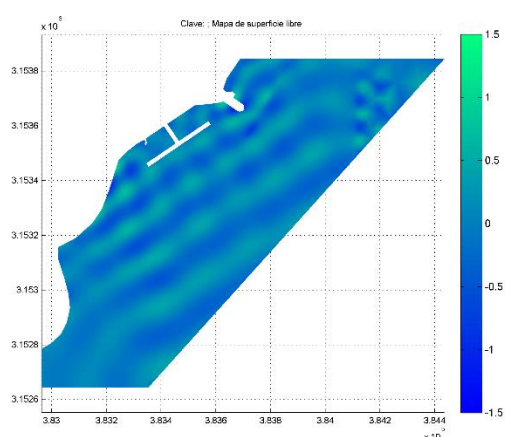


Figura 108: Elevación de la superficie del agua
18/06/2012

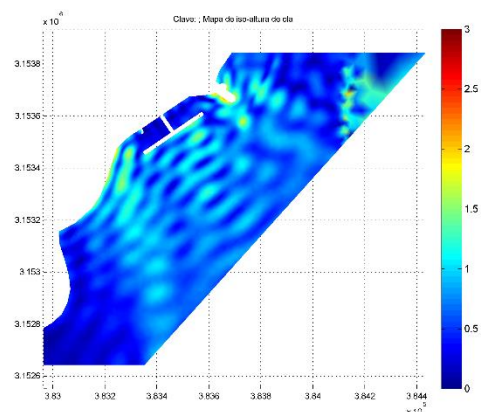


Figura 109: Altura significativa de ola 18/06/2012

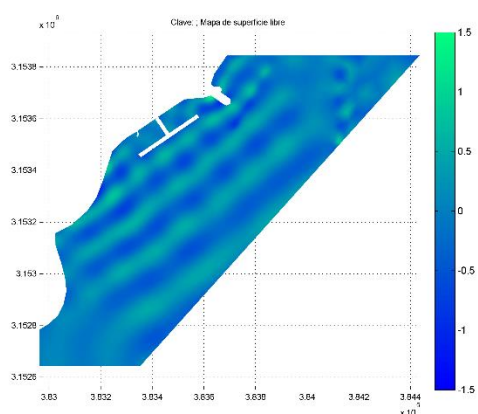


Figura 110: Elevación de la superficie del agua
27/08/2014

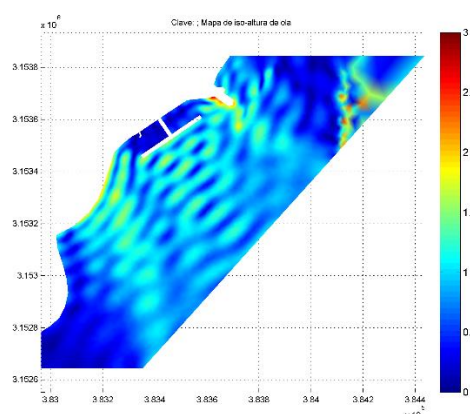


Figura 111: Altura significativa de ola 27/08/2014

Como puede verse en el modelo, y considerando que el oleaje del Grupo 3 provoca un comportamiento hidrodinámico combinado de los dos oleajes anteriores, la estructura de abrigo planteada es efectiva. Aunque algunas de las olas del Grupo 3 tengan una componente direccional Sur, estas olas no son tan dañinas a pie de avenida, debido a que el acoplamiento longitudinal se es de menor importancia que en el caso del oleaje del Sur. El dique bloquea por



completo el oleaje, creando una zona de sombra que abarca toda la longitud de la avenida marítima. Por consiguiente, se reducen oleajes incidentes caracterizados por una altura de ola entorno al metro, a alturas de ola a pie de avenida iguales o menores a 0.5 m.

5.3 Resultados de altura en puntos de control y rebases

Se muestran a continuación mediante gráficas las alturas de ola registradas en cada uno de los puntos de control una vez definida la estructura de abrigo durante cada uno de los eventos de oleaje. Se adjuntan también gráficas donde se representa el valor de caudal de rebase obtenido a partir de la ecuación del EuroTop.

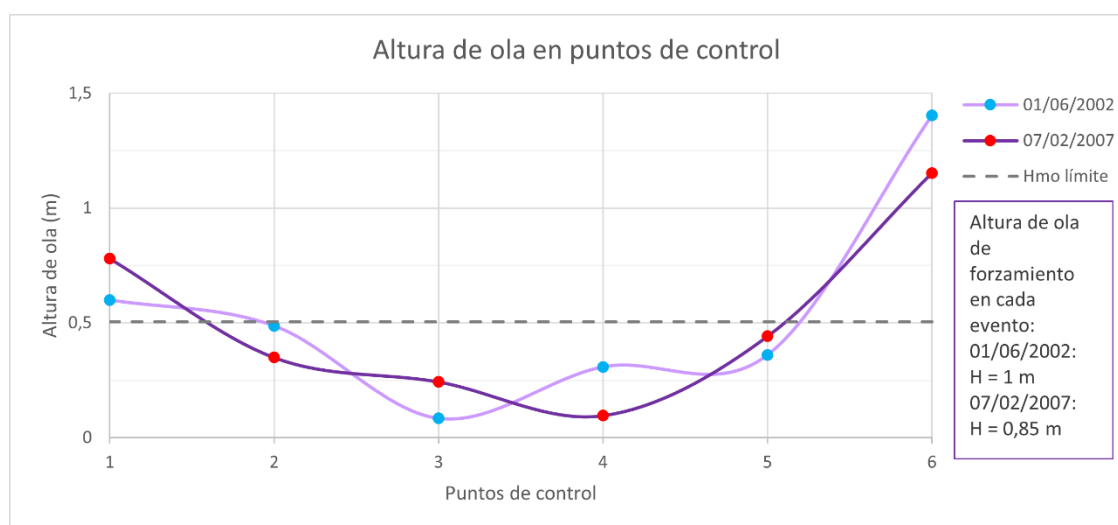


Gráfico 7: Altura de ola en puntos de control con estructura de abrigo para Grupo de oleaje 1 - Este

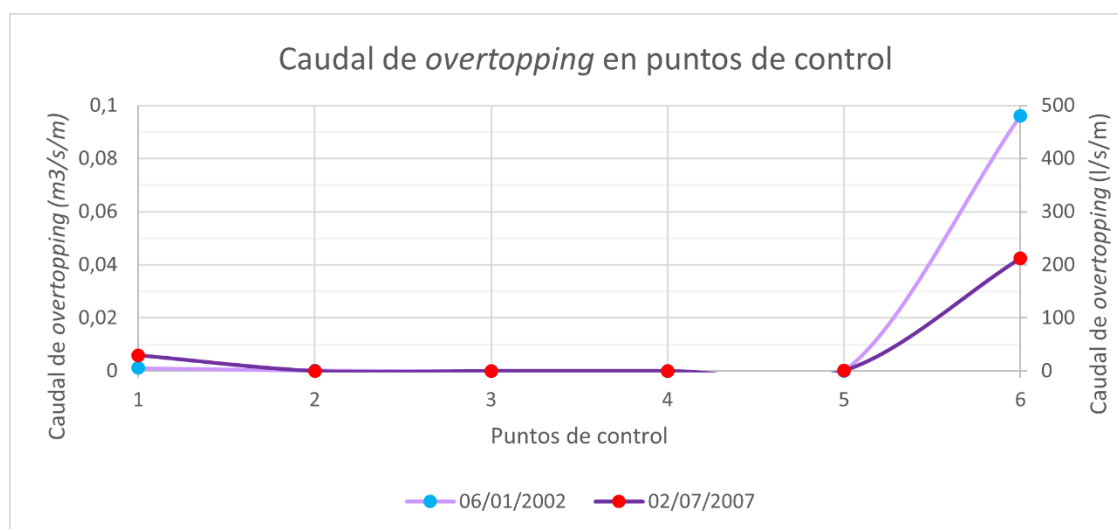


Gráfico 8: Caudal de overtopping en puntos de control con estructura de abrigo para Grupo de oleaje 1 - Este

Puede observarse que, en el caso del oleaje del Este, la altura de ola no se ve tan reducida en la zona del punto de control 6. Esta zona se sitúa en el espigón que separa la avenida marítima y la playa de Las Teresitas. Por tanto, con el objetivo de reducir los posibles daños causados por rebases, se requiere reforzar la zona del espigón.

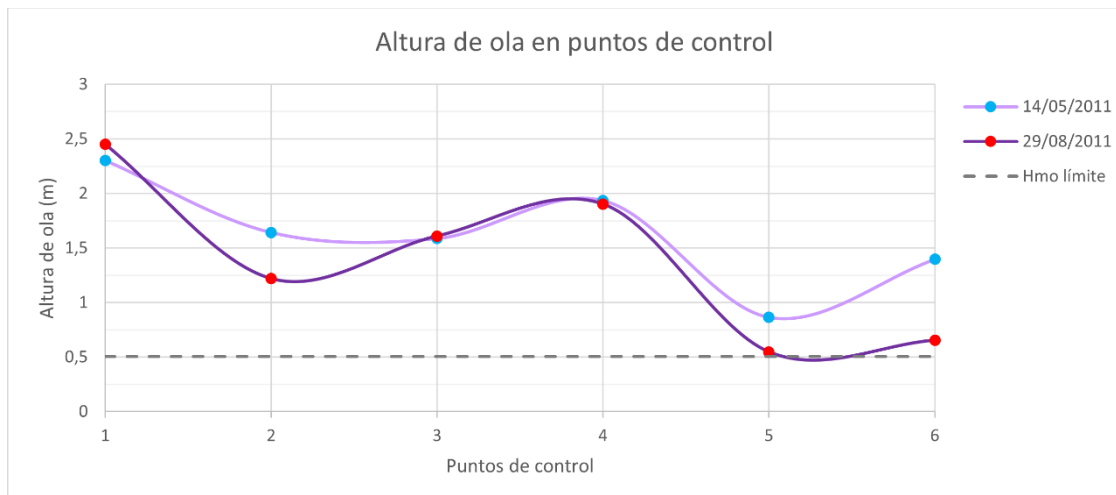


Gráfico 9: Altura de ola en puntos de control con estructura de abrigo para Grupo de oleaje 2 - Sur

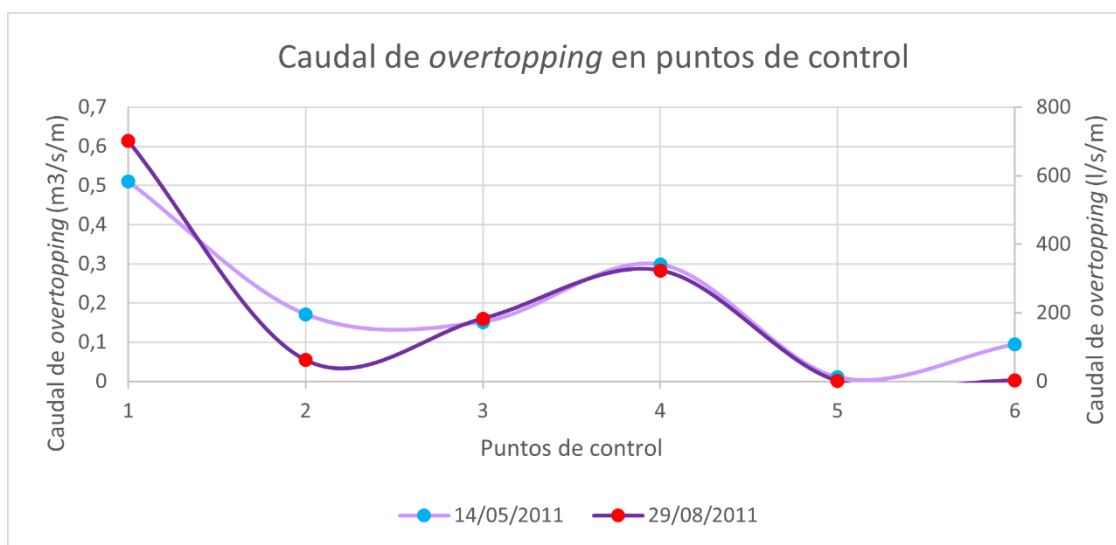


Gráfico 10: Caudal de overtopping en puntos de control con estructura de abrigo para Grupo de oleaje 2 - Sur

En el caso del oleaje de dirección Sur, la altura de las olas no se reduce hasta el límite establecido por el código con la solución planteada. Sin embargo, no se debe de olvidar que el modelo MSP se ha utilizado en su forma monocromática (no espectral) por lo que cabe que los oleajes resultantes se vean mayorados especialmente al generarse parones muy marcados de máximos y mínimos (nodos y antinodos de la onda propagada y reflejada). Por tanto, existen hipótesis y asunciones a lo largo del montaje del modelo que afectan a los resultados obtenidos y que serán discutidas a continuación en las conclusiones generales de este TFG.

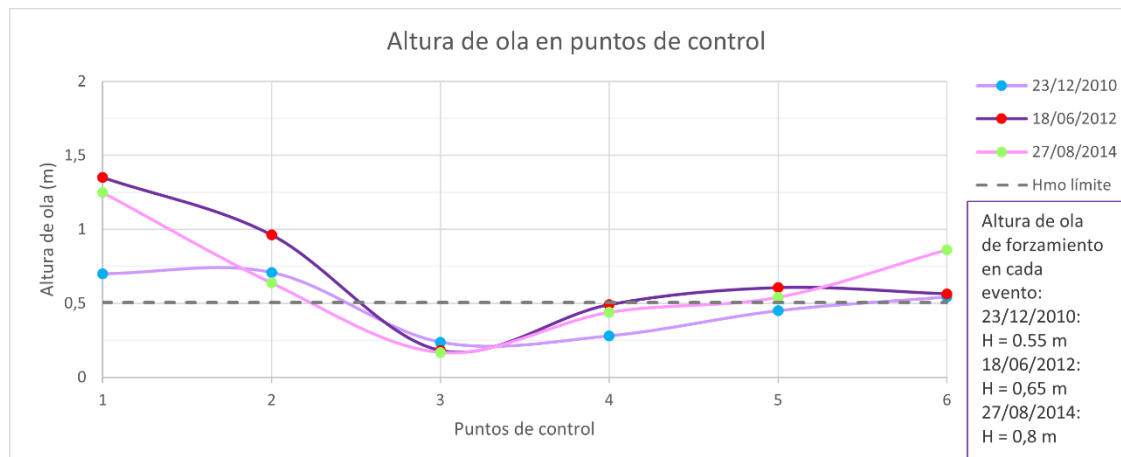


Gráfico 11: Altura de ola en puntos de control con estructura de abrigo para Grupo de oleaje 3 - Sureste

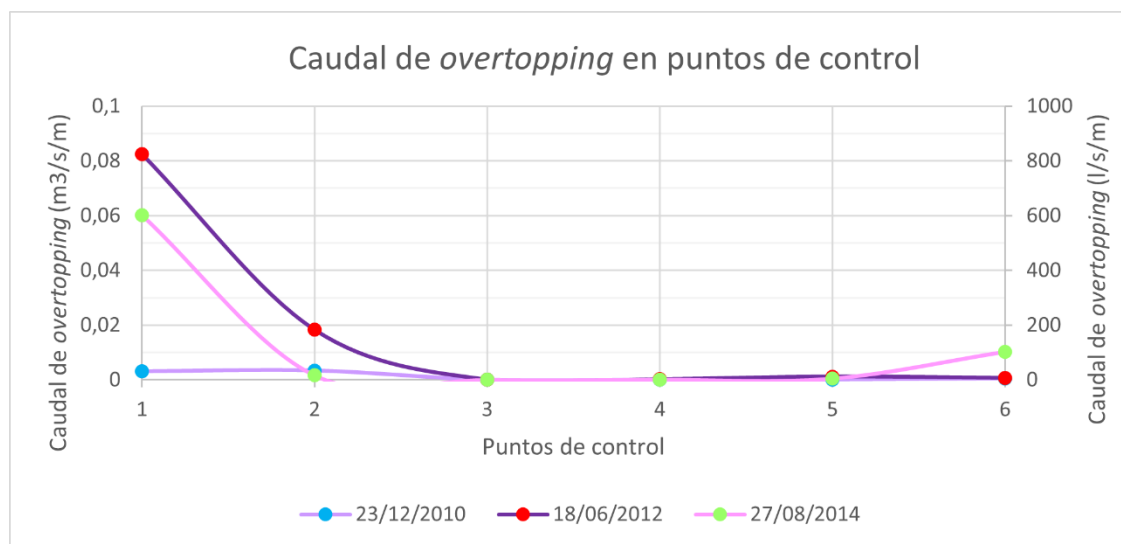


Gráfico 12: Caudal de overtopping en puntos de control con estructura de abrigo para Grupo de oleaje 3 - Sureste

Finalmente, en el caso del oleaje del Grupo 3, oleaje del Sureste, la altura de ola se reduce de manera considerable a lo largo de la avenida marítima. Únicamente, y debido a la componente Sur de las olas contenidas en este grupo, se registran olas significativamente mayores al máximo establecido en los puntos de control 1 y 2.

Es importante destacar que, las formulaciones de rebase de oleaje que el EuroTop proporciona pueden considerar una reducción en dicho caudal calculado con base en el ángulo oblicuo de oleaje que llega a la estructura. Para este estudio no se ha tenido en cuenta y solo se ha considerado el ángulo ortogonal de propagación del oleaje hacia la estructura, que corresponde al caso pésimo. Por lo tanto, los resultados aquí mostrados de rebases se pueden considerar del lado de la seguridad.

5.4 Análisis de efectividad relativa de la estructura

A lo largo del apartado anterior, con ayuda de los gráficos, se ha apreciado que tanto las alturas de ola registradas, como el caudal de rebase son mayores a los establecidos como máximos anteriormente ($H_{m0} \leq 0.505$ m y $q_{\text{límite}} \leq 0.3$ l/s/m respectivamente) aun con la estructura de abrigo protegiendo a la avenida de San Andrés de la propagación del oleaje. Sin embargo, y comparando los valores registrados en esta segunda situación con los valores obtenidos sin dique, con la estructura construida, se obtiene una reducción significativa de los valores del caudal de *overtopping*. Con el fin de mostrar en términos relativos la efectividad del dique, se muestran a continuación gráficas que representan la reducción de q respecto del valor inicial en los diversos puntos de control.

Se obtiene la reducción relativa del caudal de *overtopping* mediante la siguiente expresión.

$$\Delta q (\%) = \frac{|q_{\text{dique}} - q_0|}{q_0} \times 100$$

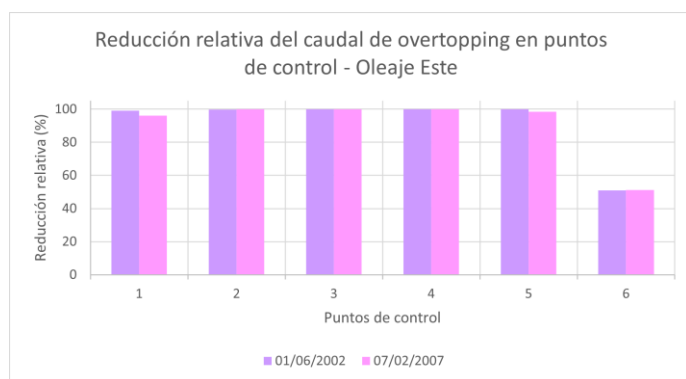


Gráfico 13: Reducción relativa del caudal de rebase para oleaje del Grupo 1 - Este

Como se ha comentado anteriormente el dique propuesto es efectivo para los oleajes de dirección Este. La reducción del caudal de *overtopping* es aproximadamente del 100% en todos los puntos de control. En el sexto punto, situado en la zona de la Cofradía de Pescadores, la altura de ola registrada no se ve tan reducida, y por tanto la reducción del caudal de rebase no es tan importante. Sin embargo, se sitúa en torno al 50%, y puede considerarse significativa.



En el caso del oleaje de dirección Sur, la efectividad de la estructura de abrigo es menor, especialmente en los puntos localizados en la zona baja de la avenida marítima. Asimismo, cabe mencionar que en el punto de control 4, la altura de ola registrada una vez planteado el dique es mayor que sin estructura de abrigo para ambos eventos. Este fenómeno puede deberse a reflexiones localizadas en puntos específicos de la estructura. Por tanto, y aun siendo menor la reducción relativa del caudal de rebase, se concluye que la estructura es también efectiva frente a oleajes del Grupo 2.

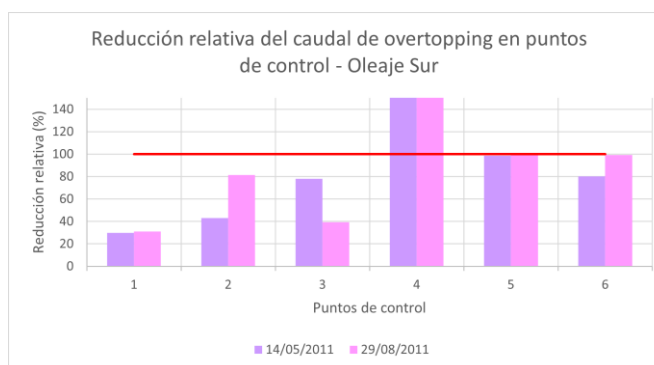


Gráfico 14: Reducción relativa del caudal de rebase para oleaje del Grupo 2 – Sur

La línea horizontal en color rojo muestra el límite de reducción relativa del 100%. Valores mayores implican que la altura de ola ha incrementado.

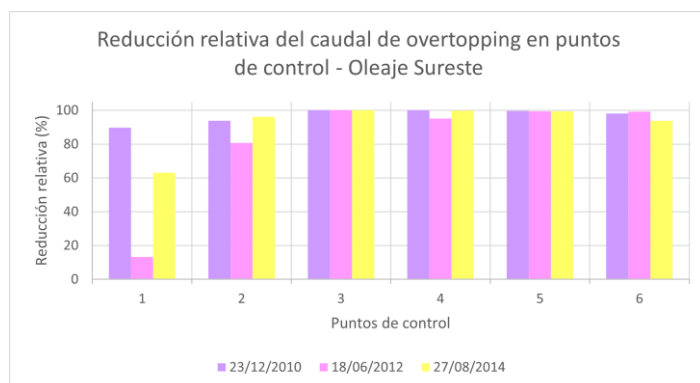


Gráfico 15: Reducción relativa del caudal de rebase para oleaje del Grupo 3 - Sureste

Finalmente, para el oleaje de dirección Sureste, la estructura planteada es efectiva, pues en la mayoría de los puntos de control la reducción del caudal de *overtopping* tiene un valor cercano al 100%. La menor reducción se registra para el punto de control 1 en el evento del 18/06/2012, debido a que es este evento el que mayor dirección Sur tiene dentro del Grupo 3, y por tanto avenida marítima no se encuentra tan protegida de la incidencia de las olas.

5.5 Conclusiones generales del análisis

El estudio ha atacado el problema de los sucesos de inundación en el pueblo de San Andrés con el propósito principal de proyectar una estructura de abrigo que aminorase la periodicidad y los desperfectos materiales y económicos asociados a estos. El punto de partida del análisis ha sido la hemeroteca consultada, en la cual se recogían diversos eventos de rebase de la avenida marítima. El objetivo fundamental de esta consulta ha sido lograr mediante un razonamiento deductivo el patrón y los factores responsables de las inundaciones.

Después de haber determinado las constituyentes principales de los eventos de rebase, se han modelado diversos dominios numéricos con el fin de propagar la información del clima marítimo proporcionadas por las bases de datos, medidas en aguas profundas, hasta el pie de la avenida marítima de San Andrés, emplazada en aguas someras. El modelo numérico ha permitido comprender el funcionamiento hidrodinámico de la costa ante diversos oleajes, lo que ha resultado de vital importancia en el momento de plantear una estructura de abrigo.

Una vez detalladas las particularidades del oleaje a pie del paseo, se han calculado los caudales de *overtopping* mediante el procedimiento concretado por el reglamento propuesto por el EuroTop. Debido primordialmente a que los caudales logrados eran significativamente superiores a los máximos recomendados por el código, ha quedado en evidencia la necesidad de resguardar el frente de la avenida mediante una infraestructura de protección.

El análisis hidrodinámico ha permitido establecer que las funciones sustanciales del dique eran no solo bloquear la propagación del oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras sino también compartimentar la costa para reducir el acoplamiento longitudinal de ondas largas. A lo largo del TFG se ha llevado a cabo el esbozo y estudio de diversas estrategias que podían ser válidas para minimizar la repercusión de las olas en San Andrés. A continuación, se ha ejecutado nuevamente un modelaje numérico, incluyendo esta vez las estructuras planteadas. Los resultados obtenidos han conducido a la determinación de la estructura definitiva.

Finalmente, se ha reproducido con el modelo numérico una última vez el comportamiento de la estructura finalista con propósito de verificar su efectividad. Ha sido posible concluir que el espigón propuesto reduce de manera considerable las alturas de ola a pie de la avenida marítima y es, por tanto, una solución eficaz. Sin embargo, para cerciorar con total certeza que no acaecen rebases a lo largo de todo el frente, es necesario modificar ligeramente el diseño proyectado para reforzar algunas zonas concretas. Estas zonas se localizan especialmente en la parte baja de la avenida marítima y en la franja del espigón que separa el pueblo de la playa de Las Teresitas.

APÉNDICES

Apéndice 1. Listado de figuras

Figura 1: Localización de San Andrés	12
Figura 2: Avenida de San Andrés.....	13
Figura 3: Ladera de San Andrés.....	13
Figura 4: Localización de los rebases de la avenida	18
Figura 5: Serie de inundación de la avenida	18
Figura 6: Esquema de translación de la Tierra alrededor del Sol.....	25
Figura 7: Esquema de creación del swell	30
Figura 9: Mar de fondo en las Islas Canarias (detalle)	31
Figura 9: Mar de fondo en las Islas Canarias.....	31
Figura 10: Relación entre oleaje de viento (azul) y ondas infragravitatorias (rojo).....	32
Figura 11: Modelo de refracción del oleaje	32
Figura 12: Modelo de difracción del oleaje.....	33
Figura 13: Batimetría de la zona de San Andrés	36
Figura 14: Representación de la Marea Astronómica.....	38
Figura 15: Representación de la Marea Meteorológica.....	38
Figura 16: Combinación de la Marea Astronómica y la Marea Meteorológica	38
Figura 17: Histograma de altura de ola significativa y periodo de pico	39
Figura 18: Histograma direccional del clima general	40
Figura 19: Tabla de estadísticos básicos para el régimen normal.....	41
Figura 20: Rosa de oleaje para el régimen medio.....	42
Figura 21: Histograma de la altura de ola significativa y periodo pico en primavera	43
Figura 22: Rosa de oleaje para primavera.....	43
Figura 23: Histograma de la altura de ola significativa y periodo pico en verano.....	43
Figura 24: Rosa de oleaje para verano	43
Figura 25: Histograma de la altura de ola significativa y periodo pico en otoño	44
Figura 26: Rosa de oleaje para otoño	44
Figura 27: Histograma de la altura de ola significativa y periodo pico en invierno.....	45
Figura 28: Rosa de oleaje para invierno.....	45
Figura 29: Características del oleaje 06/01/2002	47
Figura 30: Rosa de oleaje 06/01/2002	47
Figura 31: Características del oleaje 02/07/2007	48
Figura 32: Rosa de oleaje 02/07/2007	48
Figura 33: Características del oleaje 23/12/2010	49
Figura 34: Rosa de oleaje 23/12/2010	49
Figura 35: Características del oleaje 14/05/2011	50
Figura 36: Rosa de oleaje 14/05/2011	50
Figura 37: Características del oleaje 29/08/2011	51
Figura 38: Rosa de oleaje 29/08/2011	51
Figura 39: Características del oleaje 18/06/2012	52
Figura 40: Rosa de oleaje 18/06/2012	52
Figura 41: Características del oleaje 27/08/2014	53
Figura 42: Rosa de oleaje 27/08/2014	53
Figura 43: Batimetría de la zona de San Andrés insertada en el modelo MSP	61
Figura 44: Coeficientes de reflexión del contorno para oleaje del Grupo 1 - Este	62
Figura 45: Contorno para el oleaje del Grupo 1 - Este	62



Figura 46: Coeficientes de reflexión del contorno para oleaje del Grupo 2 - Sur.....	62
Figura 47: Contorno para el oleaje del Grupo 2 - Sur	62
Figura 48: Coeficientes de reflexión del contorno para el oleaje del Grupo 3 - Sureste	63
Figura 49: Contorno para el oleaje del Grupo 3 - Sureste.....	63
Figura 50: Malla MEF para el oleaje del Grupo 1 – Este	64
Figura 51: Malla MEF ajustada a la batimetría para el oleaje del Grupo 1 - Este	64
Figura 52: Malla MEF para el oleaje del Grupo 2 – Sur.....	65
Figura 53: Malla MEF ajustada a la batimetría para el oleaje del Grupo 2 - Sur.....	65
Figura 54: Malla MEF para el oleaje del Grupo 3 – Sureste	66
Figura 55: Malla MEF ajustada a la batimetría para el oleaje del Grupo 3 - Sureste.....	66
Figura 56: Elevación de la superficie del agua 06/01/2002	68
Figura 57: Altura significativa de ola 06/01/2002	68
Figura 58: Elevación de la superficie del agua 02/07/2007	68
Figura 59: Altura significativa de ola 02/07/2007	68
Figura 60: Elevación de la superficie del agua 14/05/2011	69
Figura 61: Altura significativa de ola 14/05/2011	69
Figura 62: Elevación de la superficie del agua 29/08/2011	69
Figura 63: Altura significativa de ola 29/08/2011	69
Figura 64: Elevación de la superficie del agua 23/12/2010	70
Figura 65: Altura significativa de ola 23/12/2010	70
Figura 66: Elevación de la superficie del agua 18/06/2012	70
Figura 67: Altura significativa de ola 18/06/2012	70
Figura 68: Elevación de la superficie del agua 27/08/2014	70
Figura 69: Altura significativa de ola 27/08/2014	70
Figura 70: Distribución de puntos de control en la avenida marítima de San Andrés.....	73
Figura 71: Esquema de la planta de la Estrategia 1	81
Figura 72: Altura significativa de ola (Este)	81
Figura 73: Altura significativa de ola (Sur)	81
Figura 74: Esquema de la planta de la Estrategia 2	81
Figura 75: Altura significativa de ola (Este)	81
Figura 76: Altura significativa de ola (Sur)	81
Figura 77: Esquema de la planta de la Estrategia 3	82
Figura 78: Altura significativa de ola (Este)	82
Figura 79: Altura significativa de ola (Sur)	82
Figura 80: Esquema de la planta de la Alternativa 1.....	84
Figura 81: Altura significativa de ola (Este)	84
Figura 82: Altura significativa de ola (Sur)	84
Figura 83: Esquema de la planta de la Alternativa 2.....	85
Figura 84: Altura significativa de ola (Este)	85
Figura 85: Altura significativa de ola (Sur)	85
Figura 86: Coeficientes de reflexión del contorno para oleaje del Grupo 1 - Este	90
Figura 87: Contorno para el oleaje del Grupo 1 - Este.....	90
Figura 88: Malla MEF para el oleaje del Grupo 1 - Este	90
Figura 89: Malla MEF ajustada a la batimetría para el oleaje del Grupo 1 - Este	90
Figura 90: Coeficientes de reflexión del contorno para oleaje del Grupo 2 - Sur.....	91
Figura 91: Contorno para el oleaje del Grupo 2 - Sur	91
Figura 92: Malla MEF para el oleaje del Grupo 2 - Sur.....	91
Figura 93: Malla MEF ajustada a la batimetría para el oleaje del Grupo 2 - Sur.....	91

Figura 94: Coeficientes de reflexión del contorno para oleaje del Grupo 3 - Sureste	92
Figura 95: Contorno para el oleaje del Grupo 3 - Sureste.....	92
Figura 96: Malla MEF para el oleaje del Grupo 3 - Sureste.....	92
Figura 97: Malla MEF ajustada a la batimetría para el oleaje del Grupo 3 - Sureste.....	92
Figura 98: Elevación de la superficie del agua 06/01/2002	93
Figura 99: Altura significativa de ola 06/01/2002	93
Figura 100: Elevación de la superficie del agua 02/07/2007	93
Figura 101: Altura significativa de ola 02/07/2007	93
Figura 102: Elevación de la superficie del agua 14/05/2011	94
Figura 103: Altura significativa de ola 14/05/2011	94
Figura 104: Elevación de la superficie del agua 29/08/2011	94
Figura 105: Altura significativa de ola 29/08/2011	94
Figura 106: Elevación de la superficie del agua 23/12/2010	95
Figura 107: Altura significativa de ola 23/12/2010	95
Figura 108: Elevación de la superficie del agua 18/06/2012	95
Figura 109: Altura significativa de ola 18/06/2012	95
Figura 110: Elevación de la superficie del agua 27/08/2014	95
Figura 111: Altura significativa de ola 27/08/2014	95

Apéndice 2. Listado de tablas

Tabla 1: Caracterización cualitativa de los eventos de inundación	21
Tabla 2: Constituyentes armónicos principales de las mareas	27
Tabla 3: Relación de eventos de inundación y fases Lunar y solar	28
Tabla 4: Componentes mareales del nivel del mar durante el evento de inundación	46
Tabla 5: Resumen de las características del oleaje de los eventos de inundación.....	54
Tabla 6: Características de los grupos de oleaje en aguas profundas para su propagación a aguas someras.....	67
Tabla 7: Comparativa de los rebases para los eventos	77
Tabla 8: Resumen de las diversas estrategias planteadas para el diseño de la estructura de abrigo	82
Tabla 9: Resumen de las diversas alternativas planteadas para el diseño de la estructura de abrigo	85
Tabla 10: Comparación multicriterio de ambas alternativas propuestas	87

Apéndice 3. Listado de gráficos

Gráfico 1: Altura de ola en puntos de control para Grupo de oleaje 1.....	73
Gráfico 2: Caudal de overtopping en puntos de control para Grupo de oleaje 1.....	74
Gráfico 3: Altura de ola en puntos de control para Grupo de oleaje 2.....	74
Gráfico 4: Caudal de overtopping en puntos de control para Grupo de oleaje 2.....	75
Gráfico 5: Altura de ola en puntos de control para Grupo de oleaje 3.....	75
Gráfico 6: Caudal de overtopping en puntos de control para Grupo de oleaje 3.....	76
Gráfico 7: Altura de ola en puntos de control con estructura de abrigo para Grupo de oleaje 1 - Este.....	96



Gráfico 8: Caudal de overtopping en puntos de control con estructura de abrigo para Grupo de oleaje 1 - Este	96
Gráfico 9: Altura de ola en puntos de control con estructura de abrigo para Grupo de oleaje 2 - Sur	97
Gráfico 10: Caudal de overtopping en puntos de control con estructura de abrigo para Grupo de oleaje 2 - Sur.....	97
Gráfico 11: Altura de ola en puntos de control con estructura de abrigo para Grupo de oleaje 3 - Sureste	98
Gráfico 12: Caudal de overtopping en puntos de control con estructura de abrigo para Grupo de oleaje 3 - Sureste.....	98
Gráfico 13: Reducción relativa del caudal de rebase para oleaje del Grupo 1 - Este	99
Gráfico 14: Reducción relativa del caudal de rebase para oleaje del Grupo 2 – Sur	100
Gráfico 15: Reducción relativa del caudal de rebase para oleaje del Grupo 3 - Sureste	100

Apéndice 4. Referencias

Bibliografía empleada

ABRAMSON, G. (2010). *Calculadora de SuperLunas y MiniLunas. En el cielo las estrellas*. [Consulta 07-12-2020]. Disponible en: <https://guillermoabramson.blogspot.com/p/la-Luna.html>

AEMET. (2018). *Definición de mar de fondo. MeteoGlosario Visual*. [Consulta 10-12-2020]. Disponible en: https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/389_mar-de-fondo

ÁLVAREZ. (s. f.). *Mar de fondo y mar de viento*. [Consulta 10-12-2020]. Disponible en: <https://www.a-alvarez.com/blog/nautica/meteorologia/mar-de-fondo-y-mar-de-viento/11183>

AXISIMA. (2017, febrero). *Mar de fondo y mar de viento*. Axisima, Ingeniería y medio ambiente. [Consulta 10-12-2020]. Disponible en: <http://axisima.com/mar-de-viento-y-mar-de-fondo/>

Calendario Lunar. (s. f.). Calendario 365. [Consulta 07-12-2020]. Disponible en: <https://www.calendario-365.es/calendario-Lunar/2007/julio.html>

DHI. (2017). *MIKE 21, Elliptic Mild-Slope Wave Module*. [Consulta 05-01-2021]. Disponible en: https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast_and_Sea/MIKE21EMS_Sci_Doc.pdf

DÍAZ HERNÁNDEZ, G. (2006, marzo). *Análisis de resonancia portuaria: generación, transitoriedad, no linealidad y acoplamiento geométrico*. [Consulta 25-02-2021] Disponible en: https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/1279/11de11.GDH_anexo.pdf?sequence=12&isAllowed=y

EARTH. (s. f.). *A global map pf wind, weather and ocean conditions*. [Consulta 10-12-2020]. Disponible en: <https://earth.nullschool.net/#2020/12/11/0900Z/wind/Surface/currents/overlay=wind/orthographic=-16.03,28.33,22592>

EMODnet Bathymetry – *The european marine observation and data network*. [Consulta 05-01-2021]. Disponible en: <https://www.emodnet-bathymetry.eu/>

EUROTOP, [Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B.]. (2018). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application*. [Consulta 01-03-2021]. Disponible en: www.overtopping-manual.com

FEYS, C. (2018). *The effect of a shallow vegetated foreshore on infragravity waves: A study with SWASH*. [Consulta 10-12-2020]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-effect-of-a-shallow-vegetated-foreshore-on-A-Feys/a4d2329c30e2b91c4eba2d6274fee5841ba86e62>

FONDEAR, S.L. (s. f.). *Mar de fondo*. [Consulta 10-12-2020]. Disponible en: http://www.fondear.org/infonautic/Mar/El_Mar/Mar_Fondo/Mar_Fondo.asp

FRANCO GARCÍA, A. (2016). *Análisis armónico de las mareas*. [Consulta 07-12-2020]. Disponible en: http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/datos/mareas/mareas_1.html

G. LIZANO, O., G. (s. f.). *Las mareas y su relación con fenómenos astronómicos y meteorológicos*. CIENETEC. [Consulta 07-12-2020]. Disponible en: <https://www.cientec.or.cr/astrologia/mareas.html>

GARCÍA-VALDECASAS BERNAL, J. M., Puertos del Estado, & Ministerio de Fomento. (2016, octubre). *Modelos oceánicos de propagación de oleaje*. Universidad de la Laguna. Disponible en: <http://www.puertos.es/es-es/BibliotecaV2/Modelos%20oceanicos.pdf>

GARRO, R. (2012). *Mareas – Tipo de mareas*. Para Náuticos. [Consulta 07-12-2020]. Disponible en: <http://www.paranauticos.com/Notas/Tecnicas/Mareas/tipos-mareas.htm>

GEVIC. (s. f.). *Situación y descripción paisajística – Tenerife – GEVIC (Gran Enciclopedia de Virtual Islas Canarias)*. GEVIC Naturaleza y Cultura. [Consulta 05-12-2020]. Disponible en: https://www.gevic.net/info/contenidos/mostrar_contenidos.php?idcat=36&idcap=58&idcon=329

IH CANTABRIA. *MSP*. [Consulta 05-01-2021]. Disponible en: <http://archivo.ihcantabria.com/index.php/item/680-msp>

IH CANTABRIA. *IHData | Climatic Database developed by the Environmental Hydraulics Institute of the Universidad de Cantabria*. IH Data. [Consulta 05-01-2021]. Disponible en: <https://ihdataprot-a.ihcantabria.com/>

JALÓN ROJAS, I. (2013, enero). *Análisis de armónicos de marea astronómica con T_TIDE*. [Consulta 07-12-2020]. Disponible en: https://fluyendolibremente.wordpress.com/2013/01/11/analisis-de-armonicos-de-marea-astronomica-con-t_tide/

MIKHAIL, L. (2020, marzo). *Mareas*. GeoEnciclopedia. [Consulta 07-12-2020]. Disponible en: <https://www.geoenciclopedia.com/mareas/>

MORENO SIERRA, A. (s. f.). *Reflexión del oleaje*. [Consulta 05-01-2021]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/383087716/Reflexion-de-Oleaje>

OLIVARES SANCHEZ-MELLADO, I., & SANTOS, M. (2015, septiembre). *Simulación y modelización de las mareas y análisis de su aprovechamiento por una turbina de mar*. Actas de las XXXVI



Jornadas de Automática. Disponible en:
<https://www.ehu.eus/documents/3444171/4484744/151.pdf>

Plan insular de ordenación de Tenerife – Caracterización del litoral insular. (2011, febrero). [Consulta 07-12-2020]. Disponible en: https://www.tenerife.es/planes/PIOT/adjuntos/ADef_E-Base_Puertos_Feb2011_8.pdf

Pueblo de San Andrés y Playa de las Teresitas – Santa Cruz de Tenerife. (2015). Isla de Tenerife Vívela. [Consulta 05-12-2020]. Disponible en: <https://www.isladetenerifevivala.com/2015/01/pueblo-de-san-andres-y-playa-de-las.html>

San Andrés - Anaga - Tenerife. (2016). Isla de Tenerife Vívela. [Consulta 05-12-2020]. Disponible en: <https://www.isladetenerifevivala.com/2016/11/san-andres.html>

SANDS CORP S.L. (s. f.). *Modelado del medio físico.* SandS | Ingeniería de Costas y Puertos. [Consulta 05-01-2021]. Disponible en: http://www.sands.es/modelado_2_agi.html

TORRES FREYERMUTH, A. (2017, enero). *Transformación de ondas infragravitatorias en medios marinos no homogéneos.* Gaceta Instituto de Ingeniería, UNAM, [S.l], v. 1, n. 83, p. 19-21. ISSN 1870-347X [Consulta 10-12-2020]. Disponible en: <http://gacetaii.iingen.unam.mx/Gacetall/index.php/gii/article/view/1454>

TURISMO TENERIFE. (s. f.). *Playa de las Teresitas – Playas – Tenerife.* [Consulta 05-12-2020]. Disponible en: <https://www.webtenerife.com/que-visitar/playas/las+teresitas.htm>

VYZIKAS, T. (2014, febrero). *Application of numerical models and codes.* MERiFIC (Marine Energy in Far Peripheral and Island Communities). [Consulta 25-02-2021]. Disponible en: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00324/43550/43111.pdf>

WALKER, J. (1997). *Lunar Perigee and Apogee Calculator.* [Consulta 07-12-2020]. Disponible en: <http://fourmilab.ch/earthview/pacalc.html>

Sin olvidar, todo el material proporcionado en la clase de Coastal Engineering (G1156) del grado en Ingeniería Civil de la Universidad de Cantabria impartida por Fernando Mendez Incera y María Sonia Castanedo Barcena.

Eventos de inundación (expuestos en orden cronológico)

El Día. (7 de enero de 2002). *El día de reyes dejó mucha calima y mal tiempo en Tenerife.* [Consulta 10-11-2020]. Disponible en: <http://www.eldia.es/2002-01-07/VIVIR/VIVIR2.htm>

El Día. (5 de julio de 2007). *Las “llagas” de Anaga.* [Consulta 10-11-2020]. Disponible en: <http://www.eldia.es/2007-07-05/ultima/ultima3.htm>

La Opinión. (5 de julio de 2007). *Los destrozos en la avenida de San Andrés estarán arreglados en 10 días.* [Consulta 10-11-2020]. Disponible en: http://www.laopinion.es/secciones/noticia.jsp?pRef=2822_2_91341

Antena 3 Canarias. (23 de diciembre de 2010). *Consecuencias del oleaje en San Andrés.* [Consulta 10-11-2020]. Disponible en: http://www.antena3.com/canarias/noticias/medioambiente/consecuencias-oleaje-san-andres_2010122300159.html

Diario de avisos. (14 de mayo de 2011). *Fuerte oleaje en San Andrés*. [Consulta 10-11-2020]. Disponible en: <http://www.diariodeavisos.com/2011/05/15/tenerife/fuerte-oleaje-en-san-andres>

El Día. (17 de mayo de 2011). *Más de diez mil euros en pérdidas entre los comercios de San Andrés*. [Consulta 10-11-2020]. Disponible en: <http://www.eldia.es/2011-05-17/santacruz/santacruz2.htm>

La Opinión. (30 de agosto de 2011). *Las olas golpean de nuevo a San Andrés*. [Consulta 10-11-2020]. Disponible en: <http://www.laopinion.es/tenerife/2011/08/30/olas-golpean-nuevo-san-andres>

El Diario. (18 de junio de 2012). *El oleaje "tumba" el nuevo muro de San Andrés*. [Consulta 10-11-2020]. Disponible en: El oleaje 'tumba' el nuevo muro de San Andrés (eldiario.es)

El Diario. (13 de noviembre de 2012). *Una playa doble para evitar el oleaje en San Andrés*. [Consulta 10-11-2020]. Disponible en: Una playa doble para evitar el oleaje en San Andrés (eldiario.es)

Cadena de suministro. (25 de julio de 2014). *El puerto de Tenerife aprueba la licitación urgente del dique de San Andrés*. [Consulta 10-11-2020]. Disponible en: <https://www.cadenadesuministro.es/noticias/el-puerto-de-tenerife-aprueba-la-licitacion-urgente-del-dique-de-san-andres/>

El Diario. (27 de agosto de 2014). *El oleaje causa estragos en Canarias*. [Consulta 10-11-2020]. Disponible en: El oleaje causa estragos en Canarias (eldiario.es)

Diario de avisos. (17 de septiembre de 2014). *El Puerto adjudica la construcción del dique de San Andrés a Sacyr*. [Consulta 10-11-2020]. Disponible en: <http://www.diariodeavisos.com/2014/09/adjudican-sacyr-construccion-del-dique-san-andres-por-mas-31-millones/>

Diario de avisos. (20 de octubre de 2015). *El dique de San Andrés ya protege al pueblo aun sin estar terminado*. [Consulta 10-11-2020]. Disponible en: <http://www.diariodeavisos.com/2015/10/dique-san-andres-ya-protege-al-pueblo-aun-sin-estar-terminado/>

Diario de avisos. (17 de mayo de 2016). *Puertos de Tenerife retira la grúa del dique de San Andrés*. [Consulta 10-11-2020]. Disponible en: <https://www.atlantic-canarias.com/puertos-de-tenerife-retira-la-grua-del-dique-de-san-andres/>